

Caracterización geológica y mineralógica de las unidades sedimentarias de interés económico localizadas desde el sector Puente Tierra, Bucaramanga, hasta el desvío hacia Bocas, municipio de Rionegro, Santander (Colombia).

Carlos Andrés Castro Muñoz

Carlos Andrés Pilonieta Pinzón

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Carlos Alberto Ríos Reyes

PhD. en Ciencias Aplicadas

Codirectora

Ana Milena Cardozo Ortiz

Geóloga

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de ingenierías fisicoquímicas
Escuela de geología
Bucaramanga**

2018

Dedicatoria

A mi padre Orlando Castro Díaz y a mi madre Rosa María Muñoz Zambrano que con su amor, educación, orientación y apoyo permanente ha sido posible alcanzar esta meta en mi vida.

A mi hermano mayor Diego Mauricio Castro Muñoz que con su apoyo y enseñanzas han aportado a mi formación como persona.

A los demás miembros de mi familia que siempre han estado brindándome su apoyo incondicional.

A todos mis amigos que han sido parte durante todo mi proceso de vida estudiantil.

Finalmente, a Dios, por darme la oportunidad de cumplir esta meta personal.

Carlos Andrés Castro Muñoz

Dedicatoria

Más que dedicatoria, agradezco a la vida por enseñarme con esto, que uno está donde quiere estar, y que somos el resultado de nuestras propias decisiones.

C.A.P.P.

Agradecimientos

Al grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada, GIGBA, de la Universidad Industrial de Santander por apoyar y facilitar el desarrollo del proyecto.

Al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander, Parque Tecnológico de Guatiguará y su personal, por el servicio suministrado para la obtención de datos mediante la Microscopía Electrónica de Barrido.

Al Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatiguará y a su personal, por el servicio suministrado para la obtención de datos mediante la Difracción de Rayos X.

Nuestros más sinceros agradecimientos a nuestra co-directora la profesora Ana Milena Cardozo Ortiz por su acompañamiento durante el desarrollo del proyecto.

A la docente Ms.C Lidy Osorio Carreño y al geólogo Sergio Iván Gómez Valderrama por siempre estar dispuestos a resolver dudas y aportar conocimiento en el proyecto.

Al titular minero Bernardo Vargas Castillo por facilitar todos los recursos posibles para realizar la campaña de campo.

A nuestros compañeros de geología y amigos que apoyaron este proyecto, entre estos, Miguel Orjuela, Jahir Rangel, Juan Pablo Oviedo, Ángel Salazar, Joan Uribe, Jesús Rojas, Juan Camilo Contreras, Denis Rueda, Carlos Moreno, Andrés Buitrago, Juan Sebastián Carvajalino, David Ardila, Carlos Guerrero, Paula Díaz, Néstor Zipamoncha, Luis Murillo, Omar Latorre, Daniela Marín, Tatiana Suárez.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	22
1. Justificación.....	23
2. Objetivos.....	25
2.1 Objetivo general.....	25
2.2 Objetivos específicos.....	25
3. Localización.....	26
4. Metodología.....	27
4.1 Fase de Pre-Campo.....	27
4.2 Fase de Campo.....	27
4.3 Fase de Laboratorio.....	29
4.3.1 Preparación de secciones delgadas.....	29
4.3.2 Análisis petrográfico.....	30
4.3.3 Preparación de muestras para MEB.....	30
4.3.4 Análisis MEB.....	30
4.3.5 Preparación de muestras para DRX.....	31
4.3.6 Análisis DRX.....	32
4.4 Oficina.....	33
4.4.1 Redacción del informe final.....	34
5. Antecedentes.....	34
6. Marco teórico.....	38
6.1 Rocas Carbonatadas.....	38

6.1.1 Clasificaciones para rocas sedimentarias carbonatadas.....	38
6.1.2 Usos de la roca caliza	41
6.1.3 Grado de pureza de la caliza según el CaCO_3	42
6.2 Métodos de análisis instrumental	43
6.2.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	43
6.2.2 Difracción de Rayos-X (DRX)	46
6.3 Aspectos mineros.....	50
6.3.1 Recurso Mineral	50
6.3.2 Reservas Mineras.....	51
6.4 Cálculo de volúmenes.....	52
6.4.1 Tonelaje Mineral.....	54
7. Geología local.....	54
7.1 Geología estructural.....	55
7.1.1 Falla Bucaramanga	55
7.1.2 Falla de Rionegro.....	57
7.1.3 Falla Hércules	58
7.1.4 Falla El Porvenir	60
7.1.5 Falla La Clandestina	61
7.2 Unidades litoestratigráficas	62
7.2.1 Formación Diamante (PCd).....	62
7.2.2 Formación Bocas (TRb)	65
7.2.3 Formación Jordán (Jj):.....	68
7.3 Unidades litodémicas.....	70
7.3.1 Batolito de Rionegro (Jgd):	70
7.3.2 Dique andesítico	72
7.4 Depósitos Recientes.....	73
7.4.1 Cuaternario (Qal).....	73
8. Resultados y análisis.....	74

8.1 Cartografía	74
8.2 Petrografía	77
8.2.1 Formación Diamante	77
8.2.2 Formación Bocas	81
8.2.3 Dique Andesítico	87
8.3 Análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	88
8.3.1 Sección Delgada CC1-M1 (Fm. Diamante)	88
8.3.2 Sección delgada CC5-M1 (Fm. Diamante)	93
8.3.3 Sección delgada CC12-M1 (Fm. Bocas)	99
8.3.4 Sección delgada CC12-M2 (Fm. Bocas)	102
8.3.5 Sección delgada CC30-M1 (Dique Andesítico)	104
8.4 Análisis Mediante Difracción de Rayos-X (DRX)	110
8.5 Cálculo de volúmenes	120
9. Discusión	124
10. Conclusiones	130
Referencias bibliográficas	132

Lista de Tablas

Tabla 1. Tabla de discriminación composicional, donde se muestra el resumen del conteo de puntos para la sección delgada CC12-M1.	82
Tabla 2. Tabla de discriminación composicional, donde se muestra el resumen del conteo de puntos para la sección delgada CC12-M1.	82
Tabla 3. Mostrando valores d para los tres picos de mayor importancia y magnitud de 4 minerales de comunes en rocas calizas. Modificado de ICDD (1997).....	110
Tabla 4. Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC1-M1.	111
Tabla 5. Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC7-M1.	112
Tabla 6. Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC12-M1.	115
Tabla 7. Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC23-M1.	117
Tabla 8. Tablas de volúmenes de roca para el bloque 1 y el bloque 2.....	122
Tabla 9. Reservas Probables de caliza, calculadas en total para el área de estudio, dentro de las áreas definidas como Bloque 1 y Bloque 2	123

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.	26
Figura 2. Transectas realizads en la fase de campo.	28
Figura 3. Formato utilizado para el levantamiento de columnas estratigráficas.	29
Figura 4. Fotografía de los equipos utilizados para la fase del MEB.	31
Figura 5. Fotografía de las herramientas utilizadas para la fase de DRX.	32
Figura 6. Difractograma obtenido para la muestra CC1-M1.	33
Figura 7. Esquematzación de insumos generados durante esta fase del proyecto.	34
Figura 8. Clasificación textural para rocas carbonatadas según Dunham (1962).	39
Figura 9. Clasificación composicional de Folk (1974) para rocas carbonatadas.	40
Figura 10. Clasificación para rocas mixtas.	40
Figura 11. Esquema de los principales derivados de la caliza.	41
Figura 12. Categorización del grado de pureza de la caliza según su % de carbonato de calcio.	42
Figura 13. Esquema mostrando las distintas longitudes de onda y frecuencias	46
Figura 14. Representación de la ley de Bragg.	47
Figura 15. Difractograma resultante de un análisis DRX a calizas.	49
Figura 16. Esquema de la relación entre resultados de exploración, Recursos Minerales y Reservas Mineras.	52
Figura 17. Esquematzación del método de secciones transversales.	53
Figura 18. Fotografía de un plano estriado con desarrollo de escalones de falla, planos riedel y antiriedel.	56

Figura 19. Fotografía de un desarrollo de brechamiento debido a su ubicación contigua al trazo principal de la falla Bucaramanga.	57
Figura 20. Fotografía de la estación CC8; sobre la vía a Bocas. Afloramiento de la Formación Bocas afectado por acción de la falla de Rionegro.....	58
Figura 21. Fotografía de la estación CC12. Zona de daño de la Falla Hércules.....	59
Figura 22. Fotografía de la estación CC12. Fallamiento inverso a escala mesoscópica	59
Figura 23. Trazo de la Falla el Provenir.	60
Figura 24. Trazo de la Falla el Porvenir y fallas de tercer orden asociadas.	61
Figura 25. Fotografía de calizas cristalinas altamente diaclasadas, dado que se encuentran dentro de la zona de daño de la Falla la clandestina y la Falla Bucaramanga.....	61
Figura 26. Fotografía de la estación CC5, dentro del título minero AGM-151.....	63
Figura 27. Fotografía de la estación CC1, dentro del título minero AGM-151.....	64
Figura 28. Fotografía de la estación CC3, dentro del título minero AGM-151.....	64
Figura 29. Fotografía panorámica de la estación CC-12 perteneciente a la Formación Bocas.	65
Figura 30. Fotografías (a) y (b) afloramientos presentes en el desvío Bucaramanga – Bocas66	
Figura 31. Fotografía de la muestra CC8-M1.....	66
Figura 32. Fotografía de la estación CC12.	67
Figura 33. Fotografía de la estación CC16, afloramiento de la Formación Bocas en la quebrada La Carpintera.	67
Figura 34. Fotografía de la estación CC-17, afloramiento ubicado en la quebrada La Carpintera.	68
Figura 35. Fotografía de la estación CC46.	69

Figura 36. Fotografía de la estación CC46.	69
Figura 37. Fotografía de los afloramientos de la unidad Jgd.	71
Figura 38. Fotografía de la estación CC6, dentro del título minero AGM-151.	72
Figura 39. Fotografía de la estación CC31. Andesita con textura porfirítica.	73
Figura 40. Fotografía de la estación CC17.	74
Figura 41. Mapa de estaciones de campo	76
Figura 42. Mapa geológico, escala 1:10.000.	77
Figura 43. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1.	79
Figura 44. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1.	81
Figura 45. Fotografía de la sección delgada CC12-M1.	84
Figura 46. Microfotografía de la sección delgada C12-M2.	86
Figura 47. Microfotografía de la sección delgada CC30-M2.	88
Figura 48. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC1-M1.	88
Figura 49. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1.	89
Figura 50. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1.	90
Figura 51. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1.	91
Figura 52. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1.	92
Figura 53. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC5-M1.	93
Figura 54. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1.	93
Figura 55. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados de los análisis puntuales realizados para el área seleccionada de la zona 1 con mayor aumento.	94

Figura 56. Fotografía de la sección CC5-M1.	95
Figura 57. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados del análisis puntual realizado para el área seleccionada de la zona 2 con mayor aumento.	96
Figura 58. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1.	96
Figura 59. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1.	97
Figura 60. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1.	98
Figura 61. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC12-M1.	99
Figura 62. Microfotografía de la sección delgada CC12-M1.	99
Figura 63. Microfotografías de la sección delgada CC12-M1.	100
Figura 64. Microfotografía de la sección delgada C12-M1.	101
Figura 65. Microfotografía de la sección delgada CC12-M1.	102
Figura 66. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC12-M1.	102
Figura 67. Microfotografía de la sección delgada CC12-M2.	103
Figura 68. Microfotografía de la sección CC12-M2.	103
Figura 69. Microfotografía de la sección CC12-M2. Bioclasto ubicado en la zona 3 con sus respectivos resultados por medio de un análisis puntual.	104
Figura 70. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC12-M1.	104
Figura 71. Microfotografía de la sección CC30-M1.	105
Figura 72. Microfotografía con análisis puntuales con sus resultados sobre cristales que pertenecen a la matriz de la sección delgada CC30-M1.	106

Figura 73 . Microfotografía de la extura amigdalar en la sección CC30-M1.....	107
Figura 74. Microfotografía de la sección CC30-M1.....	108
Figura 75. Microfotografía del área con mayor aumento de la zona 3, análisis de una zona representativa con su respectivo resultado.	109
Figura 76. Microfotografía de la zona aumentada que abarca la matriz de la roca, análisis puntual de un cristal con su respectivo resultado.	109
Figura 77. Difractograma obtenido para la muestra CC1-M1.....	111
Figura 78. Zoom de la parte central del difractograma de la muestra CC1-M1.	111
Figura 79. Diagrama mostrando los resultados semi-cuantitativos de composición de la Muestra CC1-M1.....	112
Figura 80. Difractograma obtenido para la muestra CC7-M1.....	113
Figura 81. Difractograma de la muestra CC7-M1 mostrando zoom entre 24 - 36,5 (valores de 2 θ).	114
Figura 82. Diagrama mostrando resultados semi-cuantitativos de composición de la muestra CC7-M1.....	114
Figura 83. Difractograma obtenido para la muestra CC12-M1.....	116
Figura 84. Zoom del difractograma de la muestra CC12-M1.....	116
Figura 85. Diagrama mostrando resultados semi-cuantitativos de composición de la Muestra CC12-M1.....	117
Figura 86. Difractograma obtenido para la muestra CC23-M1.....	117
Figura 87. Difractograma de la muestra CC23-M1, con zoom.	118
Figura 88. Diagrama mostrando resultados semi-cuantitativos de composición para la muestra CC23-M1.....	119

Figura 89. Difractogramas compilados para determinar la tendencia composicional general de las muestras.....	120
Figura 90. Mapa geológico con los trazos en planta de los cortes utilizados para el cálculo de volúmenes de roca.	121
Figura 91. Ejemplo de uno de los cortes geológicos utilizados en el procedimiento de cálculo de volumen de roca.	122
Figura 92. Diagrama mostrando las falencias (color rojo) y puntos a favor (color verde) de las técnicas analíticas utilizadas).....	126

Lista de Apéndices

- A.** Mapa de estaciones
- B.** Catálogo de estaciones
- C.** Mapa geológico y columnas estratigráficas
- D.** Catálogo de muestras
- E.** Cálculo de volúmenes

Resumen

Título: Caracterización geológica y mineralógica de las unidades sedimentarias de interés económico localizadas desde el sector Puente Tierra, Bucaramanga, hasta el desvío hacia Bocas, municipio de Rionegro, Santander (Colombia)*

Autores: Carlos Andrés Castro Muñoz y Carlos Andrés Pilonieta Pinzón**

Palabras clave: Petrografía, MEB, DRX, Cartografía, PTO, Composicional.

Las ausencias de cartografía a detalle en los estudios realizados al Norte de Bucaramanga han limitado el conocimiento de recursos minerales en esta zona esto con lleva al error en donde los titulares mineros del sector toman una cartografía escala 1:100.000 e información geológica regional para realizar el plan de desarrollo de un proyecto minero que no supera las 5 Ha y que necesita crucialmente datos e información local de las unidades aflorantes.

Por medio de este estudio se busca implementar una cartografía detallada 1:10.000 y la implementación de estudios composicionales como la Petrografía, Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía de Barrido Electrónico (MEB) en las unidades de mayor interés económico con el fin de generar un insumo geológico fiable y estructurado que sirva como base en el desarrollo del PTO de un proyecto minero. Además, se busca recalcar la gran importancia que tiene un geólogo en cualquier proyecto minero ya que con el tiempo este papel fundamental ha sido desarrollado por otros profesionales que no tienen el conocimiento suficiente para indagar en este tipo de información conllevando a conclusiones erradas en el yacimiento mineral.

A partir de los resultados obtenidos en las distintas fases del proyecto la unidad litoestratigráfica que presenta mejores cualidades para explotar es la Formación Diamante la cual consta de calizas cristalinas composicionalmente homogéneas y puras, la Formación Bocas y la Formación Jordán son unidades descartadas debido a su alto aporte terrígeno en su composición.

*Proyecto grado

**Faculta de Ingenieras Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes

Abstract

Title: Geological and mineralogical characterization of sedimentary units of economic interest located from the Puente Tierra sector, Bucaramanga, to the detour to Bocas, municipality of Rionegro, Santander (Colombia)*

Authors: Carlos Andrés Castro Muñoz and Carlos Andrés Pilonieta Pinzón**

Keywords: Petrography, MEB, DRX, Cartography, PTO, Compositional.

The absences of cartography in detail in the studies carried out north of Bucaramanga, have limited the knowledge of mineral resources in this area, this leads to error where the mine holders of the sector take a 1: 100,000 scale mapping and regional geological information to perform the development plan of a mining project that does not exceed 5 Ha and that crucially needs data and local information from the outcropping units.

From this study, it is sought to implement a detailed cartography 1: 10.000 and the implementation of compositional studies such as Petrography, X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electrom Microscope (SEM) in the units of greater economic interest in order to generate a reliable and structured geological input that serves as a basis for the development of the PTO of a mining project. In addition, it seeks to emphasize the great importance of a geologist in any mining project since over time this fundamental role has been developed by other professionals who do not have sufficient knowledge to investigate this type of information, leading to wrong conclusions in the mineral deposit.

Based on the results obtained in the different phases of the project, the lithostatology unit that has the best qualities to exploit is the Diamante Formation, which consists of compositionally homogeneous and pure crystalline limestones, the Bocas Formation and the Jordán Formation, are discarded units due to their high contribution terrigenous in its composition.

*Project of grade

**Faculty of Physico-chemical Engineering. School of Geology. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes

Introducción

El presente trabajo nace a raíz del cuestionamiento de ciertos aspectos metodológicos empleados en la realización del capítulo “Geología” del Plan de Trabajos y Obras (PTO) del título minero AGM-151, el cual cuenta con un área de poco menos de 5 hectáreas. Se identificó que el mapa geológico base, empleado en la generación de varios insumos de este capítulo, tiene escala 1:100.000. Entonces, teniendo en cuenta que la elección de la escala de trabajo correcta es vital para el buen desarrollo de un proyecto minero desde su delimitación, hasta su cierre; y que en el área de estudio existen algunos pequeños mineros que desarrollan sus actividades sin nada más que su perspicacia y bajo el método de prueba y el error, se decidió realizar la cartografía geológica a un mayor grado de detalle, la cual complementada con técnicas de identificación y caracterización mineral, fueron la base para definir, qué formaciones, en que intervalo estratigráfico, y en qué sectores (geográficamente hablando) existe un mayor potencial económico enfocado a la minería de materiales de construcción.

1. Justificación

La ausencia de una cartografía de detalle en cualquier zona de estudio determinada hace que se omita el conocimiento de recursos minerales y de materiales de interés industrial de esta misma; por ejemplo, que para el desarrollo de un proyecto minero que no supera las 5 Ha, se utilice como base la cartografía de una plancha a escala 1:100.000.

En estudios realizados anteriormente como el de Ward et al. (1973), Gonzales y Lázaro (1994) se plantea cierta incertidumbre con respecto al contacto entre la Formación Diamante y la Formación Bocas en cercanía a la zona de estudio. En la fase de campo, durante el levantamiento de las columnas estratigráficas, se buscará precisar la relación estratigráfica entre la Formación Diamante con la suprayacente Formación Bocas en este sector.

A la fecha los trabajos de geología que se han hecho en el sector se fundamentan en trabajos de cartografía básica (ver Antecedentes). Solo hasta el trabajo de Gonzales y Lázaro (1994) se avanza en el grado de detalle, pues realizan petrografía de la Formación Diamante y análisis infrarrojo para carbonatos. Finalmente, en Quintero (2011) realiza de nuevo la petrografía y se llega al máximo grado de detalle con análisis geoquímicos de roca fuente de hidrocarburos.

La información recolectada en el desarrollo de este trabajo tiene varios fines, el primero que es alimentar la información recolectada anteriormente en la zona por otros estudios y enfocar la obtenida en el potencial económico que pueden tener las rocas aflorantes, el segundo de carácter científico, y se enfoca al uso de estas técnicas de análisis como principal soporte a la hora de desarrollar un proyecto minero.

Y por último, se pretende reivindicar el insustituible papel del geólogo en la elaboración y revisión de los aspectos geológicos de un proyecto minero, a la vez que dar mayor visibilidad a la

participación de la academia (Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander) en el desarrollo de la industria minera en Santander y de otras regiones del país; mostrando que se pueden aprovechar estos espacios para hacer aportes al conocimiento geológico de zonas poco estudiadas en detalle.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Caracterizar geológica y mineralógicamente las unidades sedimentarias a partir de la toma de datos de campo y análisis de los resultados de laboratorio con el fin de determinar cuales tienen mayor potencial económico.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar la cartografía geológica a escala 1:10.000 de la zona de estudio.
- Realizar el levantamiento de columnas estratigráficas detalladas.
- Realizar estudios petrográficos a las unidades geológicas que se consideren de interés económico, para determinar sus principales rasgos mineralógicos y texturales.
- Caracterizar composicionalmente las muestras de roca seleccionadas como de interés a partir de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos x (DRX) con el fin de determinar las fases minerales presentes y el grado de pureza.
- Realizar el cálculo de reservas dentro del área que presente las mejores características de interés económico.

3. Localización

La zona de estudio se encuentra limitada por las coordenadas N1'289.600m; N1'292.000m y E1'102.000m; E1'104.000m. Geográficamente nos ubicaremos primero en el departamento de Santander, Colombia, y posteriormente en la ciudad de Bucaramanga y el municipio de Rionegro. Dentro de estos dos puntos geográficos se encuentra el área de estudio, más exactamente en la vereda San Isidro Bajo la cual su entrada conecta con la vía principal Bucaramanga – Rionegro. Dentro de esta vía encontraremos tres puntos de referencia importantes, el primero es la estación de buses de Puente Tierra, el segundo denominado “el cero” por la gente del área y por el cual queda el desvío hacia el caserío de Bocas y el tercero que es el Km 1,3 de esta vía. (Ver Figura 1).

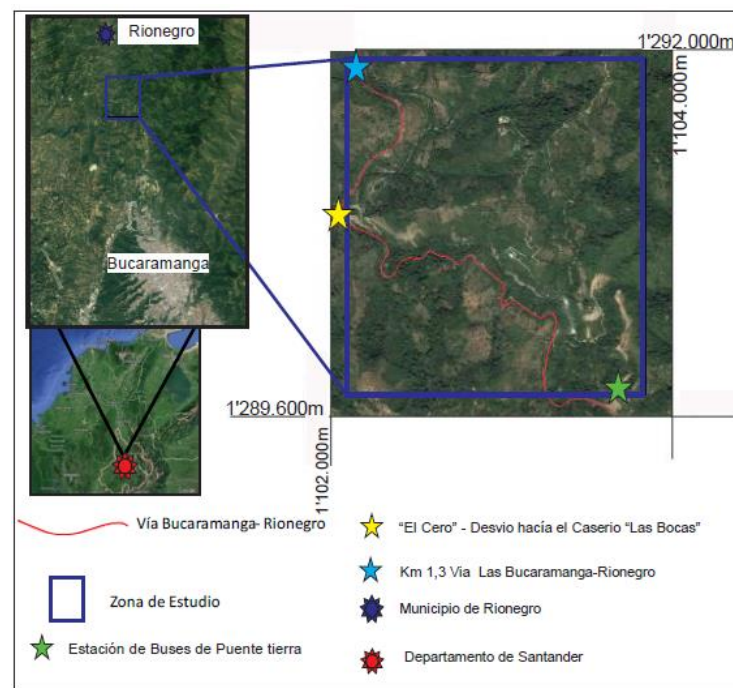


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Tomado y editado de galería de imágenes Landsat de Google Earth (2017).

4. Metodología

La metodología de este trabajo se desarrolló en 5 fases:

4.1 Fase de Pre-Campo

Como fase inicial, se basó en la revisión de los trabajos de cartografía (mapas y memorias explicativas) que tuviesen influencia en el área de estudio. Además de recopilaron fuentes bibliográficas como artículos científicos, trabajos de grado, informes técnicos relacionados tanto con las formaciones de interés como con la implementación de técnicas analíticas (DRX-SEM) en la caracterización de rocas sedimentarias (esencialmente carbonatadas), utilizando la base de datos de la Biblioteca-UIS como principal fuente de acceso a la información.

También se realizó un pre-análisis geomorfológico de la zona en el cual se determinaron los principales lineamientos; este análisis se llevó a cabo mediante el programa Google Earth (Free Version).

4.2 Fase de Campo

Inició con la verificación de la información cartográfica preexistente, reportada en los trabajos de cartografía que involucran el área de estudio (Ward, et al. 1973; Clavijo J. y Royero J., 2001), y de las estructuras definidas en el análisis de imágenes satelitales de Google Earth.

Las transectas principales (Ver Figura 39) para el reconocimiento y descripción de las unidades aflorantes en la zona fueron las siguientes:

- La vía Bucaramanga-Rionegro, desde el paradero de buses de “puente tierra” hasta el puente que llega al caserío de Bocas.
- La vía Bucaramanga-Rionegro, desde el punto denominado “el cero” hasta el peaje Rionegro.
- Quebrada la Carpintera, desde el título minero AGM-151 hasta la desembocadura del afluente en el Rio Negro.

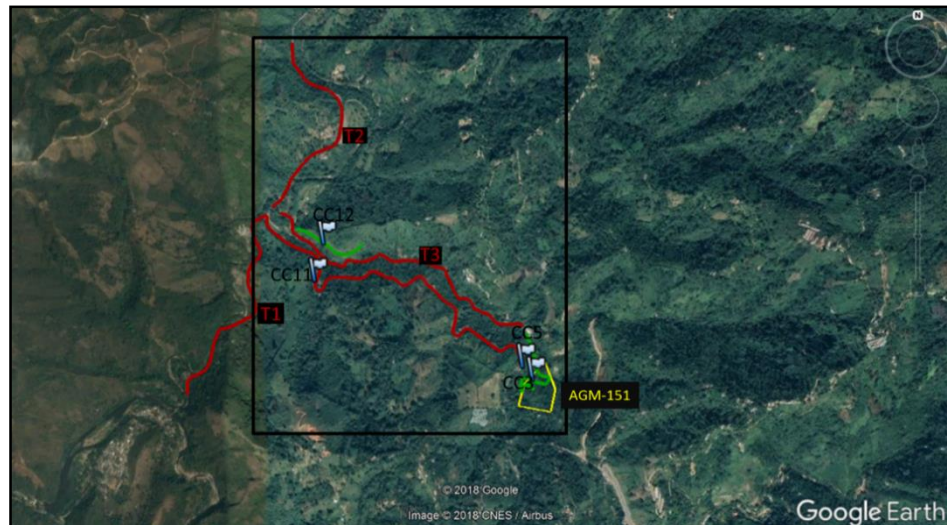


Figura 2. Transectas realizadas en la fase de campo. Área de estudio enmarcada en el rectángulo negro. Los trazados rojos muestran las transectas principales (T1-T2 y T3), los trazados verdes, las transectas secundarias. Los íconos en forma de banderas muestran las estaciones donde se levantaron las columnas estratigráficas (CC3; CC5; CC11; CC12). En amarillo se resalta el título minero AGM-151. Tomado y editado de galería de imágenes Landsat de Google Earth.(2017)

Adicionalmente se realizaron otras estaciones y puntos de control donde los afloramientos y fisiografía lo permitían. Este proceso permitió recopilar los datos necesarios para la realización del mapa geológico (Ver Apéndice C – Mapa geológico) identificar las áreas con las mejores características para el levantamiento de columnas estratigráficas y el respectivo muestreo y descripción mesoscópica de las características litológicas, texturales y estructurales de los intervalos definidos como de interés.

4.3.2 Análisis petrográfico. Las secciones delgadas fueron analizadas y fotografiadas empleando el microscopio triocular de luz transmitida marca LEICA, modelo DM750P, en el laboratorio del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada – GIGBA de la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, Sede Guatiguará. Las clasificaciones utilizadas fueron las de Dunham (1962); Folk (1974) y Mount (1985); (Ver Capítulo 6.1.3)

4.3.3 Preparación de muestras para MEB. Las cinco secciones delgadas previamente analizadas en el microscopio petrográfico fueron sometidas al análisis por medio de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Su preparación de consistió en dar un recubrimiento de alúmina a cada una de las secciones delgadas (proceso llevado a cabo en el Laboratorio de Preparación de Muestras de la Escuela de Geología-UIS). Posteriormente la misma superficie previamente pulida fue recubierta con Grafito (C) en la máquina Q150 Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater, el cual se encuentra ubicado dentro del laboratorio de microscopía ubicado en la Universidad Industrial de Santander – Sede Guatiguará. (Ver Figura 4a)

4.3.4 Análisis MEB. Una vez analizadas en el microscopio petrográfico, y luego de su debido acondicionamiento (presentado en el numeral anterior) las cinco secciones delgadas fueron sometidas a análisis en el MEB, esto con el fin de identificar la composición elemental de las fases minerales presentes en las muestras y caracterizar otros parámetros como la geometría y textura de los cristales.

La unidad utilizada para este fin fue el Microscopio Electrónico de Barrido, referencia: Qanta FEG 650. Ubicado en el laboratorio de microscopía ubicado en la Universidad Industrial de Santander – Sede Guatiguará. (Ver Figura 4b)

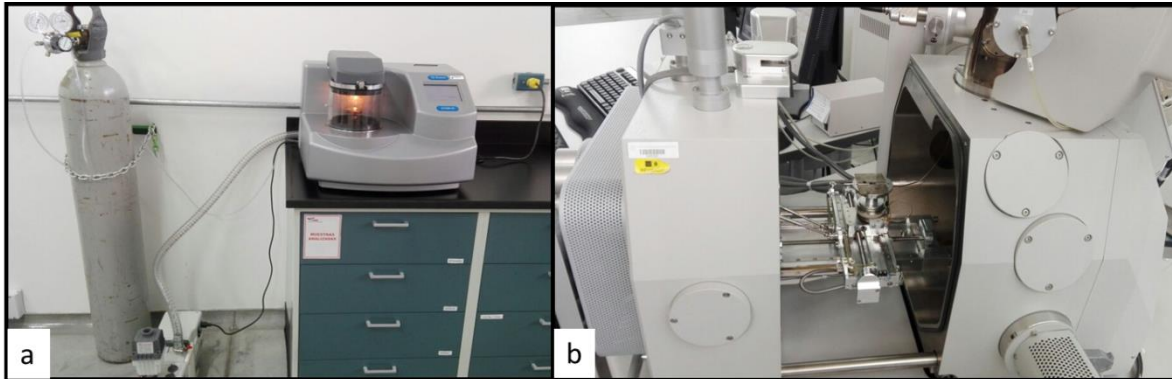


Figura 4. Fotografía de los equipos utilizados para la fase del MEB. (a) Recubridor de muestras Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater. (b) Microscopio Qanta FEG 650. Ubicación de los equipos: laboratorio de microscopía PTG-UIS.

4.3.4 Preparación de muestras para DRX. Fueron seleccionadas 3 muestras de mano pertenecientes a la Formación Diamante (CC1-M1, CC7-M1, CC23-M1) que es la unidad litológica que presenta el mayor interés económico y una muestra de la Formación Bocas (CC12-M1) para correlacionar los porcentajes de Carbonatos a partir de la petrografía.

Inicialmente cada muestra de roca (de aproximadamente 1000cm^3) fue fragmentada y pulverizada en el mortero de tungsteno hasta lograr que su tamaño se reduzca hasta el tamaño arena muy fina o menos ($\leq 0,0625\text{ mm}$). Posteriormente se tomó 1g de muestra, se llevó al mortero de Ágata hasta lograr que las partículas pasaran a través de un tamiz N° 400 (Apertura: $38\ \mu\text{m}$). Finalmente, la muestra tamizada fue dispuesta en un portamuestras de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

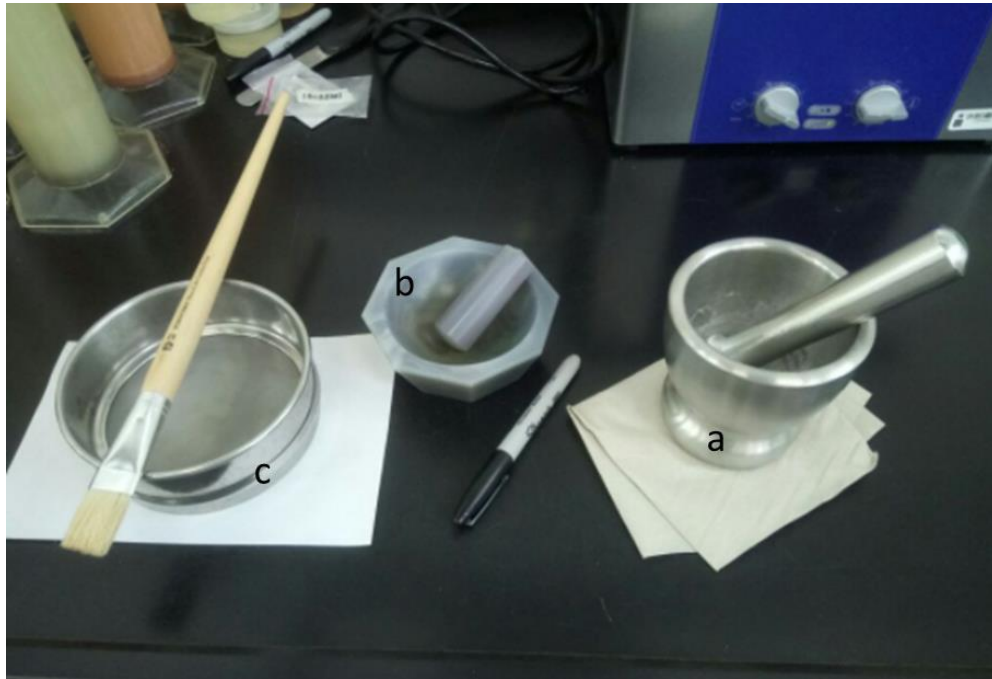


Figura 5. Fotografía de las herramientas utilizadas para la fase de DRX. a) Mortero de Tungsteno; (b) Mortero de Ágata; c) Tamiz 400. Ubicación: Sección de preparación de muestras, Laboratorio de Rayos-X, PTG-UIS.

4.3.5 Análisis DRX. El personal del laboratorio de Rayos-X fue el encargado de la obtención y entrega de los difractogramas correspondientes a cada muestra. Los datos fueron registrados en el rango de $3,5^\circ$ (2θ) a 70° (2θ), con un tamaño de paso $0,02^\circ$ y un tiempo por paso de 0,6 s.

El equipo utilizado para este fin fue el *Difractometro de Rayos-X de muestras policristalinas marca Bruker modelo D8 Advance con Geometría DaVinci*.

Posteriormente se realizó la interpretación cualitativa de los registros, la cual consistió en la identificación de los principales picos de difracción. Luego, estos fueron correlacionados con los patrones de difracción estándar de cada mineral. Este procedimiento se llevó a cabo en el software *DIFFRAC.EVA. V 4.1*

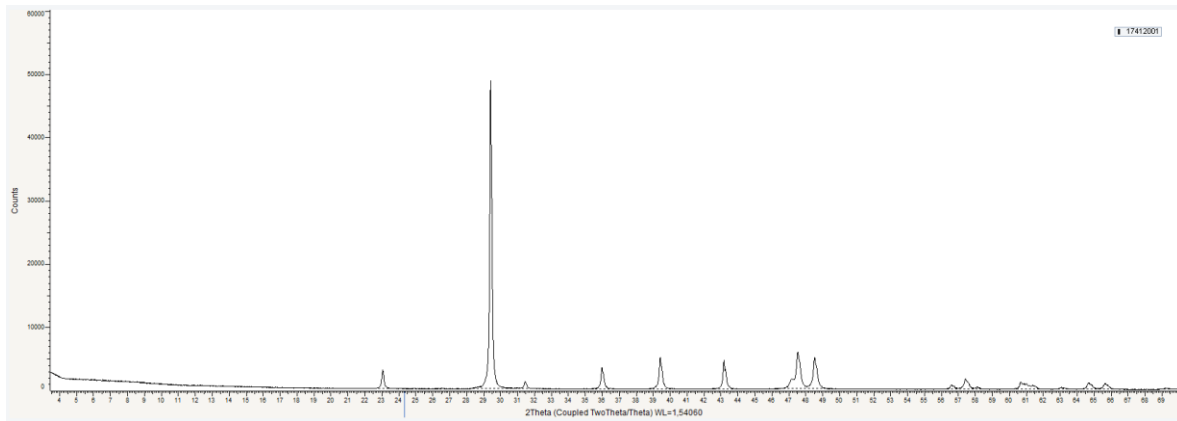


Figura 6. Difractograma obtenido para la muestra CC1-M1.

Una vez identificadas las fases minerales presentes en cada muestra, se realizó la interpretación semi-cuantitativa de abundancia para dichas fases también en el software *DIFFRAC.EVA. V 4.1*

4.4 Oficina

En esta fase se generaron los insumos finales (mapa geológico, cortes geológicos, catálogos, columnas estratigráficas, análisis petrográfico, caracterización mineralógica detallada) a partir de los datos recopilados en las fases anteriores. También se realizó el cálculo de reservas para las zonas de mayor potencial económico.

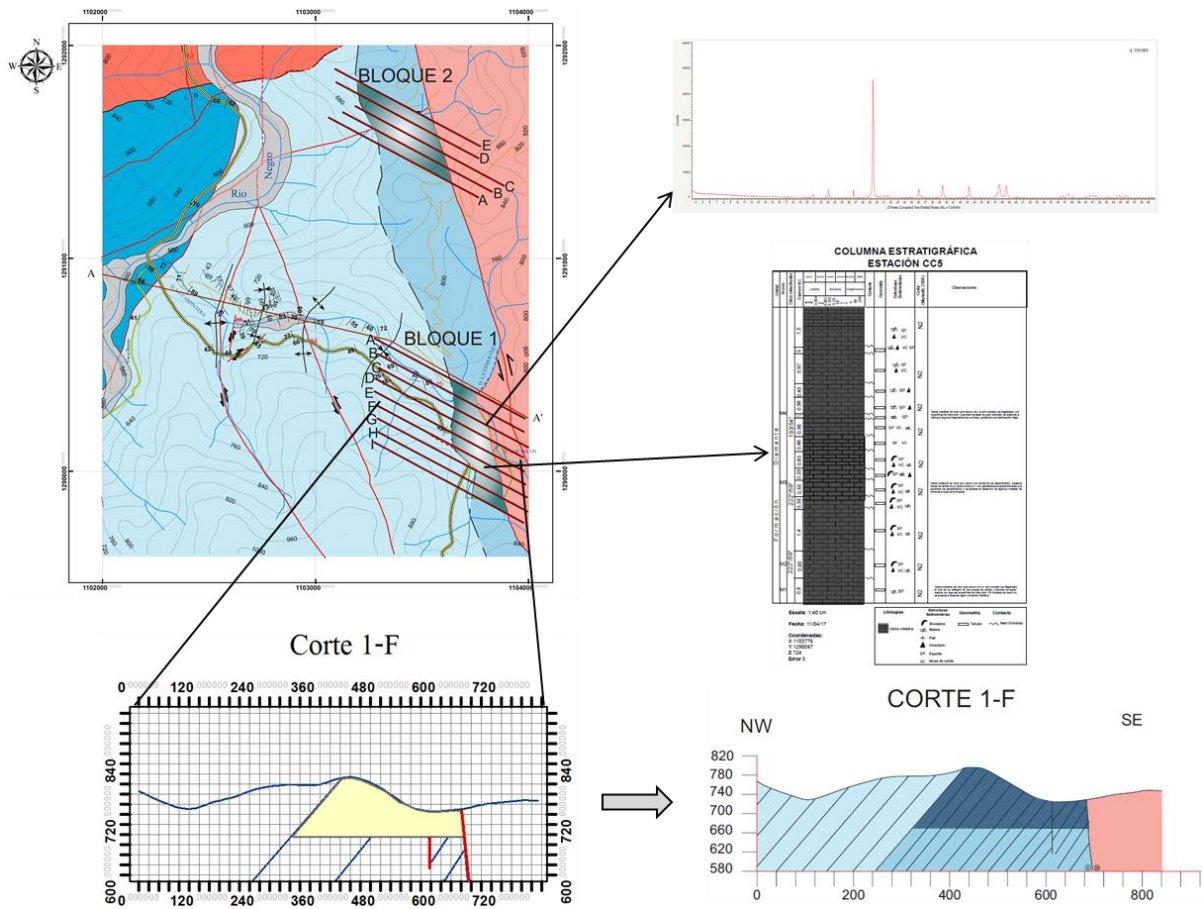


Figura 7. Esquemización de insumos generados durante esta fase del proyecto. Todas las áreas transversales para cada corte fueron calculadas en el programa ArcGis 10.1

4.4.1 Redacción del informe final. Una vez obtenidos todos los resultados y analizada la información, se procedió a redactar la discusión, las conclusiones y recomendaciones, con lo cual culminó la elaboración del presente documento.

5. Antecedentes

Los primeros trabajos realizados en el área de estudio se desarrollaron en las décadas de los 30's y 40's (e.g., Merritt 1937; Dickey, 1941; Trumpy, 1945). Posteriormente en las décadas de los 60's y 70's se retoman los trabajos de cartografía en este sector (e.g., Navas, 1962; Ward et

al., 1973). 21 años después en Gonzales y Lazaro (1994) se realiza el primer estudio detallado en el sector, un análisis sedimentológico detallado de la Formación Diamante al Norte de Bucaramanga. Algunos autores desarrollaron trabajos enfocados a cartografía regional, aspectos geotécnicos y geoquímica de roca fuente de hidrocarburos (e.g., Clavijo y Royero, 2001; Suarez, 2005; Quintero, 2011).

Dickey (1941) describe la serie de Suratá de forma muy general en su trabajo sobre los sedimentos Pre-cretácicos de la Cordillera Oriental. Manifiesta que la serie de Suratá (a la cual pertenece la Formación Diamante) se compone de arcillolitas rojizas con niveles de cuarcita fina, también hay niveles de caliza azulada bien compactada y shales compactos de color gris azulado algo arenosos, también registra la presencia de distintos fósiles como lo son briozoarios, bivalvos, gasterópodos y braquiópodos. También nombra a la Formación Bocas como “Serie Bocas” y la describe como una serie fosilífera del Paleozoico y se propone que se le denomine así solo al trayecto entre Puentetierra a Bocas. Este autor no profundiza mucho respecto a esta unidad debido a la gran escala definida para dicho estudio.

Navas (1962) se consideran principalmente tres conjuntos estratigráficos, en el cual la Formación Diamante hace parte del Conjunto medio calcáreo el cual es considerado por este autor como el más importante por ser el que mayor potencia presenta (356 m) y además por el aspecto económico ya que la mayor parte de sus rocas constituyentes son calizas las cuales son explotadas para la industria del cemento y en menor escala en forma rudimentaria para otros fines.

Posteriormente Julivert et al. (1968) hace una recopilación de los trabajos realizados de la zona en donde se nombra algunas falencias en el trabajo de Navas (1962) en donde se ignoró totalmente la continuidad lateral de las sucesiones estratigráficas realizadas por este autor y que verticalmente no abarcan totalmente la Serie de Suratá y la Serie de Bocas. A pesar que no se tiene claro el

contacto entre estas dos unidades, Dickey (1941) y Navas (1962) las separan recalando que la Serie Suratá y Bocas están algo separadas y que se interpone una falla que hace difícil definir las relaciones entre ambas. Litológicamente describen la serie de Suratá con las mismas características de Navas (1962) y a la Serie de Bocas la describen con presencia de lodolitas con algunas capas de caliza y con capas de arenisca hacia la parte baja y lutitas carbonosas y delgadas capas de carbón hacia la parte alta (Dickey, 1941). A pesar de la falta de evidencia se dice que la Serie de Bocas suprayace a la Serie de Suratá.

Ward et al. (1973) redefinen la serie Suratá como Grupo Suratá y toman su parte inferior como la Formación Diamante en donde su nombre proviene de las canteras de Cementos Diamantes S.A. La sección tipo de esta formación está en estas canteras y hacia al NW de la antigua carretera Bucaramanga – Rionegro en donde se extiende al lado oriental de la quebrada La Mona por una distancia aproximada de 2 km. Estos autores describen un total de 440 m de espesor en la localidad tipo, donde los 139 m inferiores son areniscas de grano fino a medio con una coloración purpura oscura con unas intercalaciones de arcillolita de color similar, una sección media de 97 m tiene presencia de shale gris oscuro con unas intercalaciones de caliza del mismo color esto en la mitad inferior y en la superior arcillolita limosa gris verdoso, por último la sección superior de 204 m es caliza cristalina de grano fino a medio de un color gris oscuro y con algunos pequeños niveles de arcillolita limosa o arenisca.

Ward et al. (1973) redefine también la denominada Serie de Bocas por Dickey (1941) como Formación Bocas y la hace parte del Grupo Suratá y es dividida en dos partes una inferior que cubre a la Formación Diamante y una superior que subyacen a la Formación Jordán, se le asigna un espesor aproximado de 590 m, se dice que su contacto con la Formación Diamante puede ser normal sin embargo la sección parece estar invertida y su contacto con la Formación Jordán es

transicional cambiando su coloración en las capas de gris verdoso a marrón rojizo. Litológicamente la describen como una secuencia con presencia de limolita oscura, shalé y arcillolitas y llegan a presentar fósiles como Gasterópodos, Bivalvos y Ostrácodos datados del.

Según Gonzales y Lazaro (1994), para la Formación Diamante, el miembro inferior fue depositado en ambientes marinos someros y para los miembros medio y superior un ambiente de plataforma abierta. Además, realizan una descripción petrográfica a muestras de cada miembro y realizan un análisis químico (Infrarrojo) para el miembro superior de la Formación Diamante en la cantera de Cementos Diamante S.A.

Según Clavijo et al. (1993; citado por Clavijo y Royero (2001) la Formación Diamante es descrita como una secuencia que presenta una parte basal compuesta por arenisca gris púrpura, de grano fino, medio y localmente de grano grueso a conglomerático; una parte media con lodolita gris oscura e intercalaciones de caliza del mismo color y hacia la parte superior se conforma de caliza gris oscura, ligeramente arcillosa con delgadas intercalaciones de arcillolitas y areniscas grises a rojo grisáceas y se considera de un ambiente epicontinental.

También describen definen la Formación Bocas como una alternancia de limolitas fosilíferas gris verdosas con nódulos calcáreos, areniscas y arcillolitas calcáreas gris verdosas y gris oscuras y conglomerados grises verdosos, en la parte superior se encuentran capas delgadas de rocas volcánicas y se dice que fue depositada en un ambiente continental. Es equivalente con las Formaciones Montebel y Batá.

Según Suarez (2005), la Formación Diamante desarrolla geoformas de colinas bajas con pendientes moderadas a suaves, es separada en tres miembros principales y en cercanías al sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta las rocas se encuentran bastante fracturadas y medianamente meteorizadas.

El estudio más reciente es realizado por Quintero (2011) en el cual investiga la petroquímica de la Formación Diamante en la cantera de Cementos Diamante S.A.

6. Marco teórico

Fundamentado en el objetivo y metodología del trabajo, esta sección ha sido dividida en tres partes. La primera en la clasificación de las rocas carbonatadas y sus principales usos esto teniendo en cuenta la recopilación de bibliografía siendo este tipo de rocas las que presentan un mayor interés económico en el área de estudio, la segunda son los fundamentos de las técnicas analíticas realizadas, y la tercera enfocada en la explicación del tipo de recurso obtenido y reservas obtenidas en el desarrollo del trabajo.

6.1 Rocas Carbonatadas

Debido a que el único tipo de rocas carbonatadas reportadas el área de estudio son pertenecientes a rocas calizas, solo se describe la clasificación y su uso enfocados en este tipo de roca sedimentaria. Además, se añade el tipo de recursos minerales y reservas clasificadas en el proyecto y la teoría utilizada para el desarrollo del cálculo de volúmenes.

6.1.1 Clasificaciones para rocas sedimentarias carbonatadas. Existen diversas clasificaciones para este tipo de rocas, y varían según el aspecto que se quiera resaltar. Para describir los rasgos texturales de la roca de una manera práctica y ya universalmente conocida, se emplea la clasificación propuesta por Dunham (1962) Figura 8, pero, si lo que se quiere es resaltar

o darle un poco más de peso desde el punto de vista composicional a los componentes de la roca, Folk (1962) es una clasificación idónea. Figura 9.

Para el caso de las rocas mixtas, la clasificación de Mount (1985) relaciona en un tetraedro la relación de carbonatos (alquínicos y micrita) y terrígenos (arena y lodo) Figura 10.

TEXTURAS RECONOCIBLES DE DEPÓSITO				Componentes originales que van unidos durante el desarrollo de una biocostrucción	TEXTURAS NO RECONOCIBLES DE DEPÓSITO
Componentes que no están unidos durante el depósito		Ausencia de lodo y soportada por granos			
Contenido de lodo (tamaño arcilla y limo fino)		Soportada por lodo	Soportada por granos		
<10% de los granos	>10% de los granos				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Caliza cristalina

Figura 8. Clasificación textural para rocas carbonatadas según Dunham (1962). Tomado y modificado de Scholle (2003).

CALIZAS, CALIZAS PARCIALMENTE DOLOMITIZADAS Y DOLOMÍAS PRIMARIAS						
		ROCAS ALOQUÍMICAS I Y II Porcentaje de aloquímicos mayor de 10%		ROCAS MICROCRISTALINAS III Porcent. aloq. menor del 10%		
		ROCAS ALOQUÍMICAS ESPARITICAS (I) Cemento de calcita esparmado en porcentaje que la matriz de lodo calcáreo microcristalino	ROCAS ALOQUÍMICAS MICROCRISTALINAS (II) Matriz de lodo calcáreo microcristalino mayor que el cemento de calcita espar	Porcentaje de aloquímicos entre 1 - 10%	Aloq. < 1%	
COMPOSICIÓN VOLUM. DE ALOQUÍMICOS	Intraclastos (i) > 25%	Intraesparudita (Ii:Lr) Intraesparenita (Ii:La)	Intramicrodita (Iii:Lr) Intramicroarenita (Iii:La)	Se tiene en cuenta el aloquímico que más abunde	Micrita intraclástica (IIIi:Lr o Ia)	
	oolitos (o) > 25%	Ooesparudita (Io:Lr) Ooesparenita (Io:La)	Oomicrudita (Iio:Lr) Oomicarenita (Iio:La)		Micrita oolítica (IIIo:Lr o La)	
	Intraclastos < 25% Porcentaje de oolitos < 25% Proporción en volumen de fósiles y pellets	> 3:1 (b)	Bioesparudita (Ib:Lr) Bioesparenita (Ib:La)		Biomicrodita (IIb:Lr) Biomicroarenita (IIb:La)	Micrita fosilífera (IIIb:Lr, La o LI)
		3:1-1:3 (bp)	Biopesparudita (Ibp:Lr) Biopesparenita (Ibp:La)		Biopelmicrodita (IIbp:Lr) Biopelmicroarenita (IIbp:La)	Micrita (IIIml:La); perturbada dismicrita (IIIml:L); dolomia primaria, dolomicrodita (IIIml:L)
< 1:3 (p)	Pelesparenita (Ip:La)	Pelomicarenita (Iip:La)	Micrita pelctífera (IIIp:La)			
					Biolitita (IV:L)	

Figura 9. Clasificación composicional de Folk (1974) para rocas carbonatadas. Tomado de Cruz y Caballero (2007).

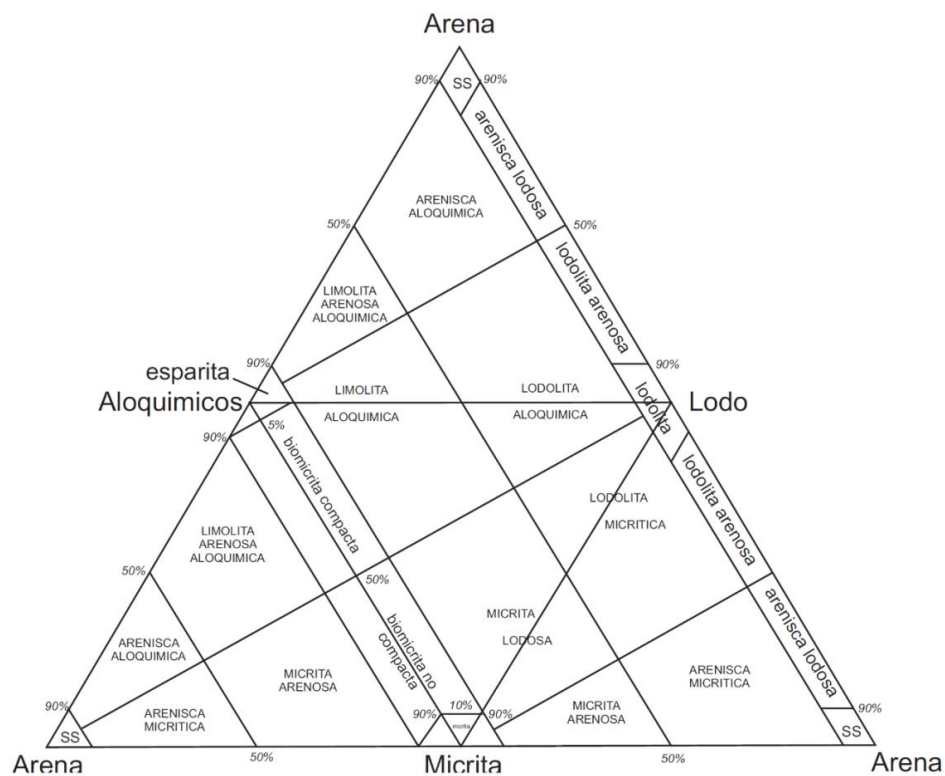


Figura 10. Clasificación para rocas mixtas. Modificado de Mount (1985).

6.1.2 Usos de la roca caliza. Las calizas son rocas sedimentarias que contienen por lo menos un 50% de minerales de calcita (CaCO_3) y Dolomita ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)$), predominando la calcita. La caliza en el ámbito industrial tiene distintos usos, sus principales son la construcción, fundición, productos químicos, agroquímicos y vidrio.

Por su importancia comercial, los principales derivados de las calizas son:

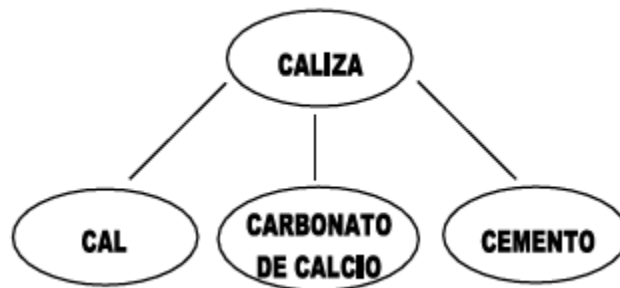


Figura 11. Esquema de los principales derivados de la caliza. Tomado de Secretaría de Economía, E.U.M (2014)

- **Cal**

Es el producto que se obtiene calcinando la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. En ese estado se denomina cal viva (óxido de calcio) y si se apaga sometiéndola al tratamiento de agua, se le llama cal apagada (hidróxido de calcio). Sus principales usos son en la metalurgia, construcción, pulpa y papel, medio ambiente, productos químicos, cerámica, recubrimientos, alimentos. *Secretaría de Economía, E.U.M (2014)*

- **Carbonato de Calcio (CaCO_3)**

La forma de obtener el Carbonato de Calcio de las rocas calizas es por medio de la molienda y la precipitación química. Sus principales usos abarcan principalmente la industria farmacéutica y la de cosméticos, menor proporción está su uso en alimentos, cerámica y vidrio, papel, pintura, plástico y hule. *Secretaría de Economía, E.U.M (2014)*

- **Cemento**

El cemento es un material aglutinante con finura similar al talco que tiene a la caliza como materia prima base, formado por diversos cristales y vidrios que al mezclarse con el agua producen una jalea de hidrosilicatos de calcio, excelente pegadura capaz de unir fragmentos pétreos para formar un conglomerado moldeable, durable, resistente e impermeable a voluntad, adaptable a diversos usos. Secretaria de Economía, E.U.M (2014)

6.1.3 Grado de pureza de la caliza según el CaCO_3 . Con las técnicas de análisis instrumental se busca obtener un grado de pureza composicional de las calizas esto con el fin de darles una clasificación y determinar su interés económico, a continuación, se muestra la tabla de referencia utilizada:

Categoría	Porcentaje CaCO_3
Muy alta pureza	> 98,5
Alta pureza	97,0 - 98,5
Media pureza	93,5 - 97,0
Baja pureza	85,0 - 93,5
Impura	< 85,0

Figura 12. Categorización del grado de pureza de la caliza según su % de carbonato de calcio. Tomado de Zhengzhou (2016).

6.2 Métodos de análisis instrumental

La implementación de técnicas avanzadas como el DRX y el MEB darán un grado de confiabilidad bastante alto a la hora de mirar la pureza respecto al CaCO_3 presente en las muestras, lo cual es fundamental para deducir el interés económico, además podrán confirmar o contradecir los análisis que se hacen mediante la petrografía.

6.2.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). En el MEB (scanning electron microscope, SEM), un haz de electrones, bajo condiciones de alto vacío y sometido a un voltaje de aceleración de 200 V a 30 kV, se hace incidir sobre una muestra gruesa, focalizándose sobre su superficie y barriéndola según líneas paralelas. Como consecuencia de la interacción de los electrones con la muestra tienen lugar una serie de emisiones, empleándose algunas de ellas para la obtención de imágenes y otras para obtener información complementaria: electrones secundarios, electrones retrodispersados, electrones Auger, rayos X, catodoluminiscencia. El estudio y utilización de cada una de estas señales requiere que el microscopio esté dotado con los detectores apropiados. Navarro (2012).

6.2.1.1 Tipos de muestras para analizar. Según Navarro, las muestras a examinar pueden subdividirse en dos grandes grupos, muestras rugosas y muestras con superficies pulidas, para este caso hablaremos solo de las muestras con superficies pulidas debido a que este análisis fue realizado a las secciones delgadas del proyecto.

- **Muestras con superficies pulidas (probetas pulidas, láminas delgadas).**

Son idóneas para obtener información sobre cuantificación de fases, observación y cuantificación de porosidad, confección de mapas composicionales o de distribución de elementos en el interior de las fases mediante análisis de rayos X, zonaciones intracristalinas, secuencias de cristalización, etc. (Melgarejo *et al.*, 2010).

Cuando se trata de muestras no conductoras debe realizarse un proceso de metalización, los más comunes y empleados son, la metalización con oro (u otros metales nobles o sus aleaciones) y el recubrimiento mediante evaporación con carbono, este segundo fue el utilizado en el desarrollo de este análisis por lo tanto se explica a continuación:

- **Recubrimiento mediante evaporación con carbono**

Es el más indicado cuando en el trabajo a realizar prima el microanálisis ya que su bajo número atómico lo hace prácticamente transparente a los rayos X emitidos por la muestra. No presenta, además, solapes con otras líneas espectrales. Como contrapartida la calidad de las imágenes obtenidas es sensiblemente inferior a las que proporciona el metalizado con oro. Este tipo de recubrimiento conductor es el que se utiliza cuando operamos sobre superficies planas sobre las que trabajaremos aprovechando las imágenes obtenidas con la señal de electrones retro dispersados.

6.2.1.2 Determinación de la composición elemental a partir de MEB. Durante las colisiones inelásticas, los electrones incidentes pueden arrancar electrones de las capas más profundas de los átomos, siempre y cuando la energía del electrón incidente sea superior al umbral de ionización

de la capa atómica en cuestión. Cuando un átomo tiene una vacante en una capa interna, se produce un salto de un electrón de una capa superior para llenar dicha vacante, que dejará otra vacante en la capa superior. Ésta se llenará a su vez mediante un salto electrónico de una capa superior y así sucesivamente. Durante cada salto, el átomo puede emitir rayos X característicos, que se denominan así ya que su energía es “característica” de cada elemento químico (la energía de un rayo X es igual a la diferencia de energías de los niveles atómicos involucrados). Como resultado del impacto electrónico, el átomo emite una familia de rayos X característicos. Melgarejo et al. (2010).

6.2.1.3 Espectrómetro de Rayos-X. Los más utilizados por su versatilidad y rapidez, son los espectrómetros de dispersión de energías (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) los cuales identifican las energías de los rayos X emitidos por la muestra y, por lo tanto, saber qué elementos químicos existen en la muestra. De este modo, al espectro continuo de rayos X, originado por la radiación de frenado, se le superpone una serie de picos que se corresponden con las radiaciones características de cada uno de los elementos presentes en la muestra. El umbral de detección de elementos varía en función de los espectrómetros utilizados (desde $Z=5$ -boro- en adelante). (Melgarejo *et al.*, 2010; Navarro, 2012).

Mediante el EDS se puede hacer una estimación cualitativa de los elementos presentes en la muestra pues la intensidad (o altura) de los picos del espectro de Rx obtenido es directamente proporcional a la cantidad de cada elemento en la muestra. Además, dado que el haz de electrones que excita la muestra puede ser muy fino (menos de $1 \mu\text{m}$), se puede llegar a estimaciones en zonas muy puntuales sobre la muestra.

Naturalmente, si se dispone de patrones adecuados con composición conocida, este análisis cualitativo se puede transformar en cuantitativo, de forma análoga a como se trabaja en cuantificación con la microsonda electrónica. También se puede utilizar un método sin patrones (denominado análisis “standar-less”). Desgraciadamente, muchos elementos producen rayos X con energías próximas a las de otros elementos y debido a la baja resolución espectral de los espectrómetros EDS, los análisis obtenidos no siempre son muy precisos, pese al desarrollo reciente de software que ha mejorado los resultados. Melgarejo et al. (2010).

6.2.2 Difracción de Rayos-X (DRX). La difracción de polvo es un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina. No se trata pues de un método analítico químico, pero, permite indirectamente estimar la composición de la muestra analizada con una buena aproximación del contenido en elementos mayoritarios. (Melgarejo *et al.*, 2010).

Los rayos X se definen como una radiación electromagnética de longitud de onda corta. Generalmente, la espectroscopia de rayos X convencional abarca la región de aproximadamente 0.1 Å a 25 Å. (Gomis Yagües, 2007).

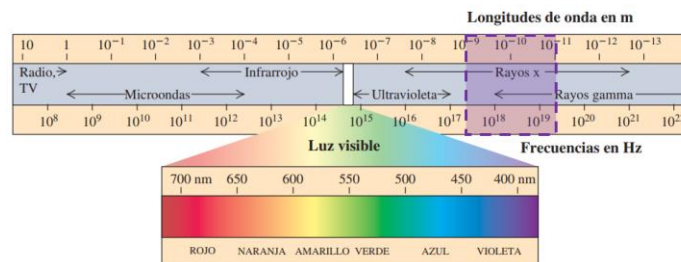


Figura 13. Esquema mostrando las distintas longitudes de onda y frecuencias, el recuadro violeta resalta el intervalo de longitudes de onda mayormente utilizado en los análisis de DRX. Modificado de Young H. y Freedman R. (2009).

Los rayos X, por tener una longitud de onda del mismo orden de magnitud que los espaciados de las redes cristalinas, experimentan fenómenos de difracción al incidir sobre un cristal. Cuando se hace incidir un haz de R-X sobre un cristal, la estructura de este hace que los rayos se reflejen en cada uno de los planos de la red cristalina, produciéndose un fenómeno de difusión. Los rayos difundidos dan lugar a fenómenos de interferencia de ondas que en su mayor parte son destructivas, excepto en determinadas direcciones en las que esta interferencia es constructiva (igual a un nº entero de longitudes de onda) teniendo lugar el fenómeno de la difracción. (Navarro, 2012).

6.2.2.1 Ley de Bragg. Cuando un haz de radiación X incide con un ángulo θ sobre la superficie de un cristal, una fracción del haz de radiación es dispersada por la primera capa de átomos del cristal, mientras la fracción restante penetra hasta la segunda capa de átomos, donde este fenómeno se repite y puede alcanzar una profundidad aproximada de 1000 nm. El efecto acumulativo de esta dispersión desde los centros regularmente espaciados del cristal es la difracción del haz de radiación. (Modificado de Gomis Yagües, 2007).

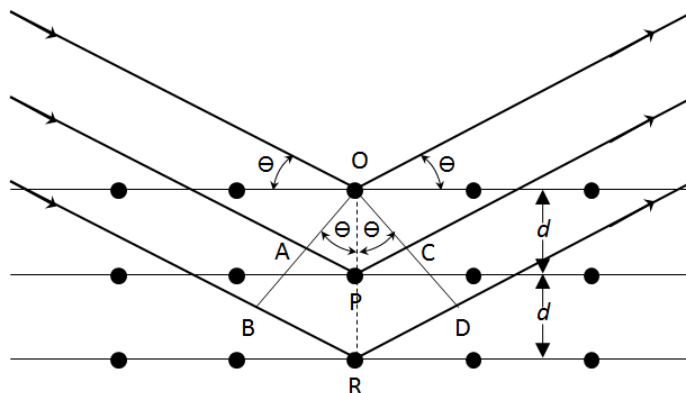


Figura 14. Representación de la ley de Bragg. Modificado de Gomis Yagües (2007).

La dispersión tiene lugar como consecuencia de la interacción de la radiación con los átomos localizados en O, P y R si se cumple que la distancia $AP + PC = n\lambda$, donde n es un entero, la radiación dispersada estará en fase en OCD y el cristal parecerá reflejar la radiación X

Partiendo de que $AP = PC = d \sin\theta$, donde d es la distancia interplanar del cristal, las condiciones para una interferencia constructiva del haz con ángulo θ son las que cumplen a ecuación de Bragg:

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

Es decir: Un cristal actúa como una rejilla tridimensional de difracción ante los rayos x, cuya longitud de onda es del mismo orden de magnitud que la separación entre átomos del cristal. Con respecto a un conjunto de planos cristalinos separados entre sí por una distancia d, hay interferencia constructiva cuando los ángulos de incidencia y de dispersión (medidos con respecto a los planos cristalinos) son iguales y cuando se satisface la condición de Bragg. (Young H. y Freedman R., 2009).

6.2.2.2 Difractograma. El difractograma es un gráfico que en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente. Los máximos o picos de intensidad corresponden a reflexiones de Bragg. (Melgarejo *et al.*, 2010). Cada mineral tiene una serie de picos característicos y su identificación atiende a sus tres picos de mayor intensidad. Obtener un pico, significa que para cada intervalo angular determinado se cumple la ley de Bragg. A menor simetría hay más planos susceptibles a difractar, lo cual condiciona el número de picos que se obtengan en el difractograma. (Perez- Monserrat, 2012).

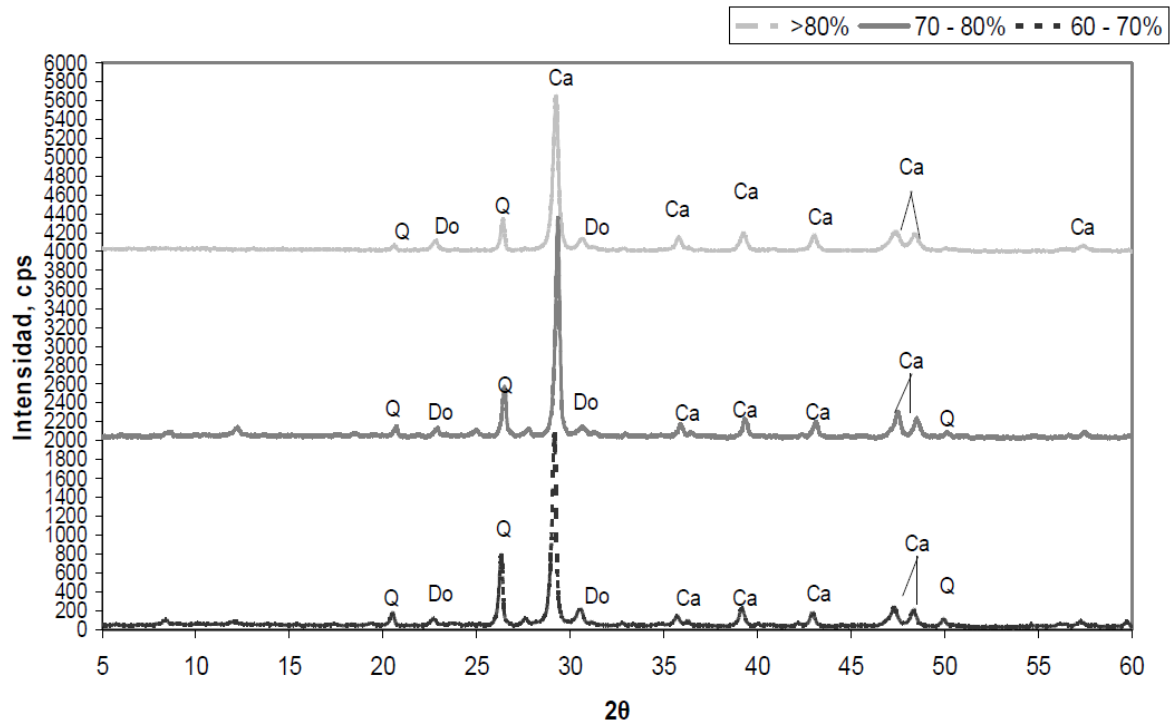


Figura 15. Difractograma resultante de un análisis DRX a calizas. Tomado de Tobón y Kases (2008).

Una vez obtenido el difractograma, y extraídos los datos de difracción de la muestra problema, la identificación consiste en hallar en la base de datos el mineral cuyo difractograma corresponde con el problema. Puesto que la base de datos de difracción de polvo consta de muchos miles de entradas, es preciso utilizar un método sistemático que conduzca con seguridad a la solución del problema. Desde 1936 existe un método manual de identificación (Método Hanawalt), muy eficiente. Sin embargo, actualmente, la mayoría de laboratorios utilizan la identificación automática mediante potentes productos de software que son proporcionados por los mismos proveedores de equipos de difracción. (Melgarejo *et al.*, 2010).

6.3 Aspectos mineros

Las definiciones utilizadas en los numerales 6.3.1 y 6.3.2 fueron extraídas de “CÓDIGO COLOMBIANO PARA EL REPORTE PÚBLICO DE RESULTADOS DE EXPLORACIÓN, ESTIMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS MINERAS”. Documento oficial de la ANM (2017).

6.3.1 Recurso Mineral. Es una concentración u ocurrencia de un material sólido con interés económico, en o sobre la corteza terrestre, de tal forma, cantidad, y calidad, que hay perspectivas razonables para una eventual extracción económica.

6.3.1.1 Clasificación de los Recursos Minerales. Estos se subdividen, en orden, de acuerdo al incremento en la confianza geológica, en tres categorías: Inferidos, Indicados y Medidos. Para el caso de este estudio solo se explicará los recursos inferidos e indicados ya que todos los datos recolectados fueron obtenidos en la campaña geológica a nivel superficial y la confiabilidad composicional es bastante alta mediante las distintas técnicas instrumentales realizadas.

- **Recurso Mineral Inferido**

Aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad y calidad son estimadas sobre muestreos y evidencias geológicas limitadas. La evidencia geológica es suficiente para asumir, pero no para verificar la continuidad geológica, el tenor o la calidad. Un Recurso Mineral Inferido no debe ser convertido a una Reserva Mineral.

- **Recurso Mineral Indicado**

Aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, calidad, densidad, forma y características físicas, son estimadas con suficiente confianza para permitir la aplicación de los Factores Modificadores, para soportar la planeación minera y la evaluación de la viabilidad económica del depósito.

La evidencia geológica se deriva de exploración detallada y confiable, ensayos realizados mediante técnicas apropiadas y toma de muestras en afloramientos, apiques, trincheras y perforaciones, suficientes para asumir la continuidad geológica y el tenor o calidad, entre los puntos de observación donde se recolectaron los datos y las muestras. Un Recurso Mineral Indicado sólo puede convertirse en una Reserva Minera Probable.

6.3.2 Reservas Mineras. Una Reserva Minera es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Esto incluye el material de dilución y pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es explotado o extraído, y está definido apropiadamente por estudios de Pre-factibilidad o Factibilidad, que incluyen la aplicación de Factores Modificadores. Para este caso solo se explicará las probables debido a que los recursos minerales son indicados esto teniendo en cuenta que el resultado solo será superficial debido a que no se conoce con certeza la continuación a profundidad debido a la falta de estudios con perforación más sin embargo si se conoce su continuidad lateral y la cota de nivel más alta.

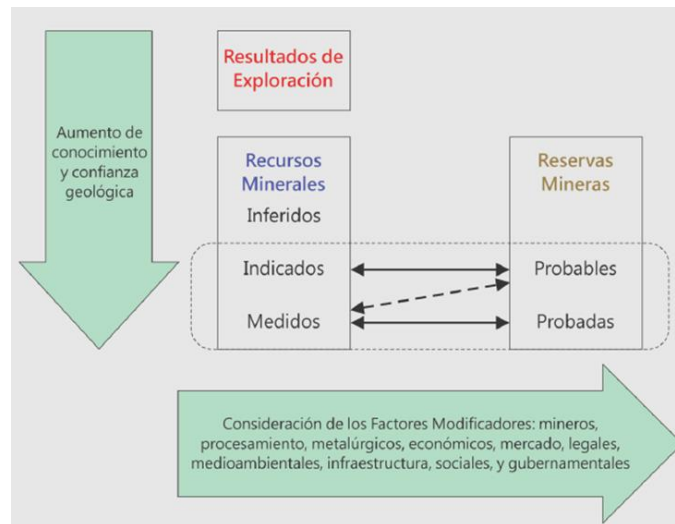


Figura 16. Esquema de la relación entre resultados de exploración, Recursos Minerales y Reservas Mineras. Los Factores Modificadores son consideraciones usadas para convertir Recursos Minerales a Reservas Mineras. Tomado de ANM (2017).

- **Reserva Minera Probable**

Parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Indicado, y en algunas circunstancias, de un Recurso Mineral Medido. La confianza de los Factores Modificadores aplicados a una Reserva Minera Probable es más baja que los aplicados a una Reserva Minera Probada. Una Reserva Minera Probable tiene la calidad suficiente para servir de base en la decisión sobre el desarrollo de un depósito.

6.4 Cálculo de volúmenes

Para proceder al cálculo de reservas de un depósito mineral es conveniente convertirlo a un cuerpo geométrico análogo, compuesto por uno o varios bloques, de tal forma que expresen lo mejor posible el tamaño, la forma y la distribución de las variables. López (2003). Dado que se trata de un yacimiento estratiforme, en el cual se ha verificado una buena conservación en la

tendencia del rumbo de las capas, y teniendo en cuenta que solamente se cuenta con datos de superficie, se concluyó que el método geométrico que mejores características brinda al cálculo del volumen de roca es el denominado método de los perfiles o secciones transversales. Este consiste en trazar perfiles verticales del yacimiento y calcular las reservas de los bloques delimitados por dos perfiles. Chávez (2017).

Según Chávez (2017), los perfiles deben cumplir con las siguientes características.

- Ser perpendiculares al rumbo del yacimiento
- Paralelos entre sí
- Distanciados regularmente
- Se construyen a partir de datos de sondeos
- Se pueden proyectar

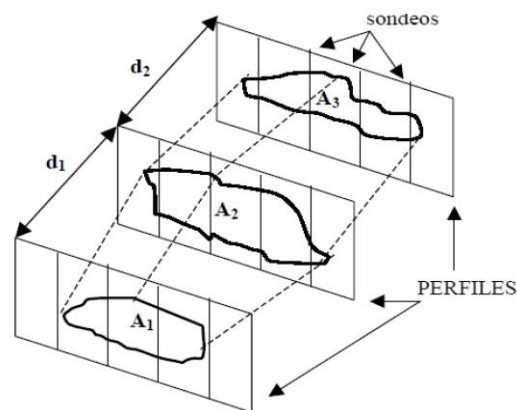


Figura 17. Esquematización del método de secciones transversales. Modificado de Rivera (2017).

Sobre cada perfil geológico se delimita el área transversal que representa el cuerpo geológico de interés, se mide dicha área sobre el perfil, luego (teniendo en cuenta el esquema presentado en la Figura 17) se calcula el volumen parcial entre cada par de cortes con la siguiente ecuación:

$$V = \left(\frac{A_1 * d_1}{2} \right) + \left(\frac{A_2 * d_2}{2} \right)$$

6.4.1 Tonelaje Mineral: La conversión del volumen en tonelaje es muy simple si se usan medidas métricas, sólo hay que multiplicar el volumen en metros cúbicos por el peso específico en gramos por centímetro cúbico para obtener el peso en toneladas métricas. (López, 2003). En base a los trabajos de Duda (1977); Fuentes (2006); y Bracamonte (2013) se definió 2.5 (kg/m³) como valor de densidad a utilizar en los cálculos de tonelaje.

$$T = V * \rho$$

T= tonelaje; V= volumen de roca; ρ = peso específico del material

7. Geología local

Por ser un trabajo con miras a la determinación de reservas de un yacimiento estratiforme, la información bibliográfica no debe ser tomada como única base en el desarrollo de este tipo de trabajos; tal como equivocadamente se ha hecho en la elaboración de muchos PTOs en el departamento. Por eso, en este capítulo se muestra un compendio entre la geología local (datos obtenidos a partir de las unidades y estructuras encontradas en la fase de campo del presente trabajo) y el marco geológico establecido a partir de los trabajos de cartografía que precedieron el presente.

7.1 Geología estructural

El entendimiento de este aspecto en el terreno es indispensable dada la naturaleza del trabajo, puesto que, aunque determinado recurso mineral sea estratiforme, es crucial determinar su continuidad, y dado no se tienen datos de perforaciones, todo el control estructural se realizó con datos de superficie.

Se identificaron varios aspectos relevantes. Las fallas de mayor magnitud son denominadas en este trabajo como fallas de primer orden, y son dos: la Falla de Bucaramanga, que surca la parte Este de la zona de estudio y la Falla de Rionegro, ubicada en la parte Oeste de la zona. Aquellas fallas que valoró, son las que siguen en magnitud, son las fallas de segundo orden, a las cuales se les asignó un nombre, y son: Falla Hércules, Falla El Porvenir y la Falla La Clandestina. Finalmente, las fallas que no se les asignó nombre, fueron consideradas como fallas de tercer orden. Todos los datos de los planos fueron medidos, y son mostrados en Azimut del Rumbo, y en las lineaciones se midió el Pitch y la Dirección de Pitch para determinar la cinemática.

7.1.1 Falla Bucaramanga. Es el rasgo tectónico más evidente. Se manifiesta separando dominios litológicos y fisiográficos contrastantes, generando sectores deprimidos (trincheras de falla) que son aprovechados por los drenajes, los cuales se alinean debido a estos factores. Esta falla deja en una posición adyacente a la Formación Diamante (PCd) de edad Permo-carbonífero con una granodiorita biotítica porfirítica del jurásico (Jgd).

Tiene una dirección aproximada N20°W y es considerado un sistema de fallas de rumbo sinistral y una componente vertical importante descrita por Julivert (1958, 1961) que hace que se

comporte en algunos sectores de forma inversa; según la memoria explicativa del Departamento de Santander (Clavijo y Royero, 2001).

Aprovechando los afloramientos cercanos al título minero AGM-151, ubicado dentro de la zona de estudio, se realizó la toma de datos estructurales (diaclasas, planos de falla y estrías) (*Ver Anexo A – Datos estructurales*). Estos evidencian la clara influencia de la falla de Bucaramanga, pues los planos identificados como principales, se determinaron cinemáticas preferencialmente sinestrales y sinestrales inversas; mientras que los planos en los que se midieron cinemáticas distintas, podrían ser planos complementarios y consecuentes del sistema riedel sinestral principal (Falla de Bucaramanga).



Figura 18. Fotografía de un plano estriado con desarrollo de escalones de falla, planos riedel y antiriedel. Dato $144^{\circ}/78^{\circ}$, P22SE, sinestral. Ubicación, estación CC1-M1.

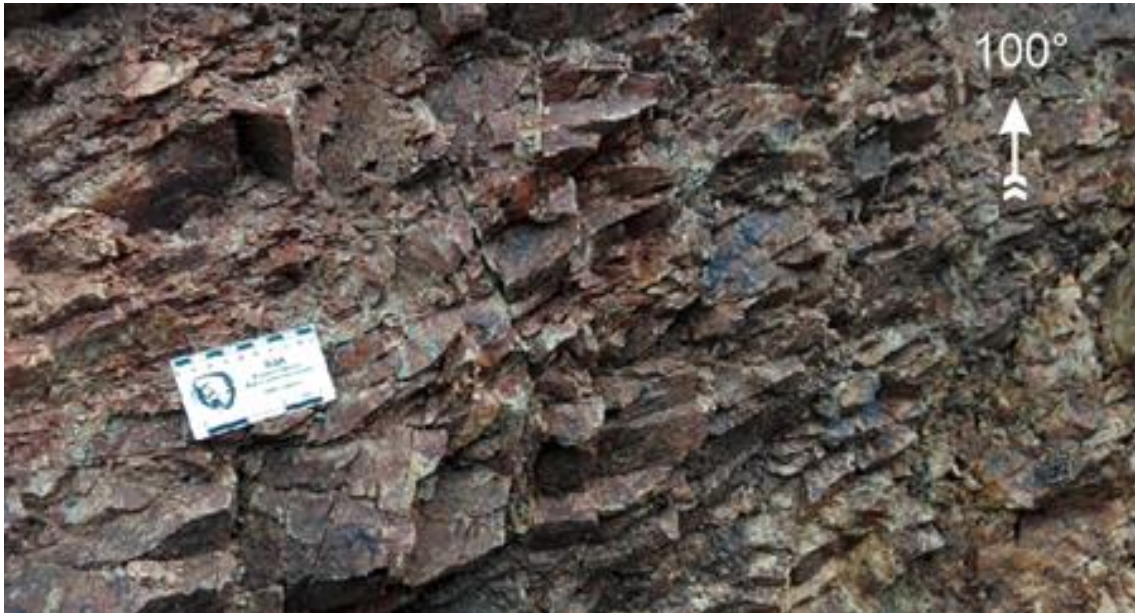


Figura 19. Fotografía de un desarrollo de brechamiento debido a su ubicación contigua al trazo principal de la falla Bucaramanga. Ubicación, estación de buses de Puente Tierra.

7.1.2 Falla de Rionegro. Tiene una dirección aproximada N-S, y los rasgos con los cuales se manifiesta esta falla es la alineación del río negro y el quiebre topográfico entre la Formación Jordán y el valle del río; además, se presenta alta deformación cataclástica sobre los afloramientos de carretera cerca al trazo de esta estructura.



Figura 20. Fotografía de la estación CC8; sobre la vía a Bocas. Afloramiento de la Formación Bocas afectado por acción de la falla de Rionegro. Dado que la litología es predominantemente lodolita, y presenta un alto grado de meteorización mecánica y química, no se encontraron estrías.

7.1.3 Falla Hércules. En la parte Sur de la zona de estudio tiene una dirección NW-SE, luego se redirecciona en dirección N-S. Confluye con la Falla El Porvenir y generan una hombrera de falla cerca del límite norte de la zona de estudio. Infringe alta deformación en los estratos de lodolitas de la parte oeste de la Formación Bocas y es paralelo al eje del Anticlinal 1.

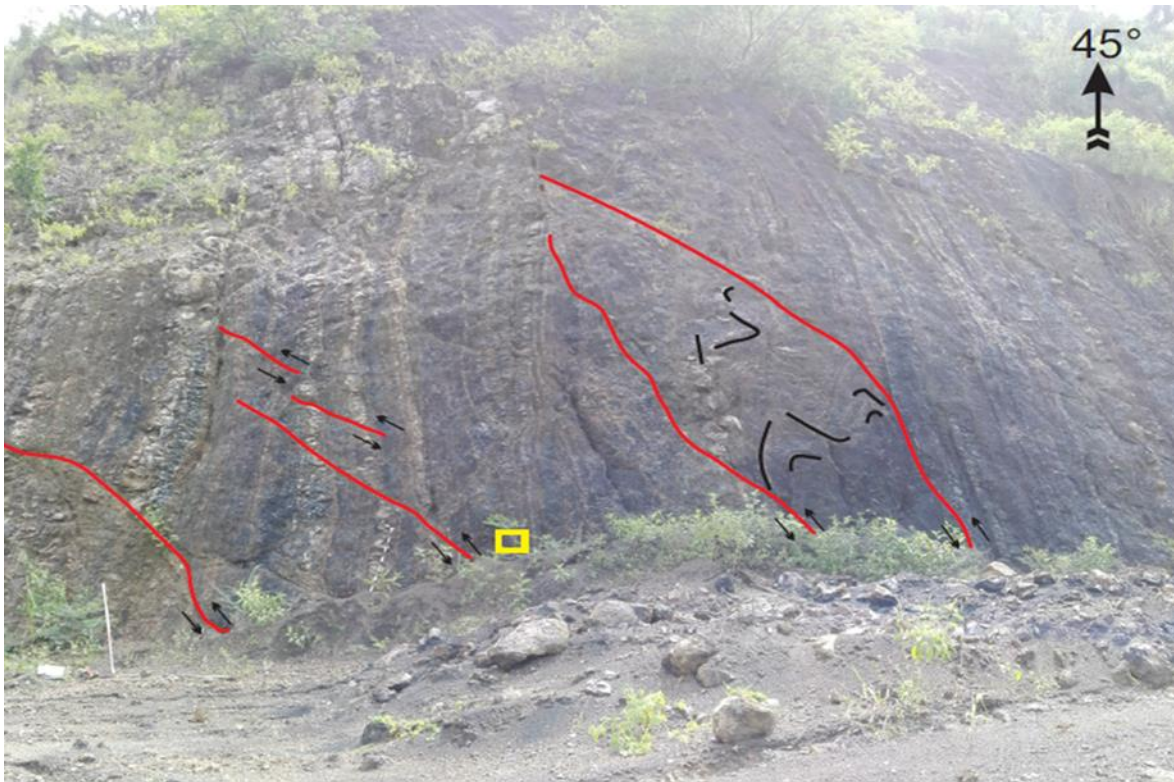


Figura 21. Fotografía de la estación CC12. Zona de daño de la Falla Hércules. Desarrollo de fallas inversas de vergencia NW sobre miembro predominantemente lodoso de la Formación Bocas. Los niveles más compactos son de limolitas silíceas. La zona del recuadro amarillo se muestra en la Figura 23.



Figura 22. Fotografía de la estación CC12. Fallamiento inverso a escala mesoscópica y con desarrollo de pliegues de arrastre en limolitas silíceas de la Formación Bocas.

7.1.4 Falla El Provenir. Tiene Dirección NW-SE, tiene cinemática Sinistral, es paralela a la Falla de Bucaramanga y Corta oblicuamente el Anticlinal 2 y converge en la parte Norte del Área de estudio con la Falla Hércules, redireccionando su trayectoria en sentido N-S. Las estrías de falla asociadas a esta falla son pocas debido a que se encuentra deformando capas esencialmente de lodolitas, por lo tanto, su preservación no es buena, salvo en los paquetes más compactos.



Figura 23. Trazo de la Falla el Provenir. Dato del plano de Falla $338^{\circ}/78^{\circ}$. Estación CC38.



Figura 24. Trazo de la Falla el Porvenir y fallas de tercer orden asociadas. Ubicación: Afloramiento CC12.

7.1.5 Falla La Clandestina. Ubicada en la parte Norte de la zona de estudio. Tiene cinemática dextral y se extiende a lo largo de toda la zona de estudio con una dirección NE-SW, el grado de deformación infringido por esta falla se muestra en la Figura 26.



Figura 25. Fotografía de calizas cristalinas altamente diaclasadas, dado que se encuentran dentro de la zona de daño de la Falla la clandestina y la Falla Bucaramanga. Estación CC7. La línea amarilla representa 2m, las líneas azules estratificación conservada.

7.2 Unidades litoestratigráficas

7.2.1 Formación Diamante (PCd). Su nombre deriva de la localidad tipo ubicada en la cantera de Cementos Diamante S.A. al norte de Bucaramanga, Ward, et al. (1973) mide un espesor de 440 m para esta unidad y la divide en tres secciones (inferior, medio y superior) sin embargo en el área de estudio solo aflora la sección superior el cual tiene un espesor de 204 m. La edad asignada a esta unidad es del Carbonífero superior al Pérmico medio, esto basado en su contenido fosilífero (Braquiópodos, Bilvalvos, Foraminíferos, Briozoarios, Crinoídeos).

La sección superior de la Formación Diamante; está litológicamente representada por calizas cristalinas (es decir, que no se alcanzan a distinguir sus componentes depositacionales ni su contenido fosilífero) color gris oscuro y muy compactas, a veces, intercaladas con niveles arcillosos con láminas de chert. En los sectores más cercanos a la falla de Bucaramanga, se evidenció un contenido muy alto de venas de calcita. Es importante mencionar que pese a que el contacto entre la Formación Diamante y la Formación Bocas no fue explícitamente visto en campo, la tendencia de los datos estratigráficos indica que la relación entre estas Formaciones es concordante; Por tanto, este contacto fue trazado sobre el mapa tomando como base los contrastes geomorfológicos.



Figura 26. Fotografía de la estación CC5, dentro del título minero AGM-151. Miembro superior de la Formación Diamante, evidente estratificación de paquetes de caliza, los cuales muestran entre si un contacto neto ondulado.

Los afloramientos presentes dentro del área de estudio se caracterizan por estar altamente fracturados debido a su cercanía con la Falla Bucaramanga, esto favorece procesos de disolución en la roca y así mismo los procesos de meteorización (Ver Figura 27).



Figura 27. Fotografía de la estación CC1, dentro del título minero AGM-151. Frente de explotación del título minero AGM-151. Caliza cristalina de la Formación Diamante con procesos de meteorización y disolución.



Figura 28. Fotografía de la estación CC3, dentro del título minero AGM-151. Miembro superior de la Formación Diamante, paquetes potentes de caliza hacia la parte central de la fotografía.

7.2.2 Formación Bocas (TRb). Su nombre proviene de la sección tipo ubicada en las cercanías de la localidad de Bocas al norte de Bucaramanga, Ward, et al. (1973) le mide un espesor de 590 m de espesor para esta unidad y Remy (1975) le asigna una edad del Jurásico inferior basado en su contenido fosilífero.



Figura 29. Fotografía panorámica de la estación CC-12 perteneciente a la Formación Bocas.

En la zona de estudio se calculó el espesor aproximado de 278m en un afloramiento de grandes dimensiones levantado por medio de poligonal, litológicamente se observa una alternancia de calizas tipo wackstone de color gris oscuro, limolitas grises calcáreas, arenitas de grano fino grises oscuras calcáreas, lodolitas negras fosilíferas (con presencia e Bivalvos y Gasterópodos) ricas en materia orgánica, niveles delgados de shale, limolitas fisiles negras y limolitas calcáreas rojizas, es afectada principalmente por la falla Rio Negro y la Clandestina. Esta formación se encuentra verticalizada (y parcialmente invertida) hacia la parte central y norte del área de estudio.

Es común encontrar que los niveles terrígenos tengan un componente carbonatado (matriz y/o cemento) y encontrar niveles de limolita y arenitas con restos de materia orgánica carbonizada tanto en la estación CC12 como en las estaciones por el desvío hacia el corregimiento de Bocas.

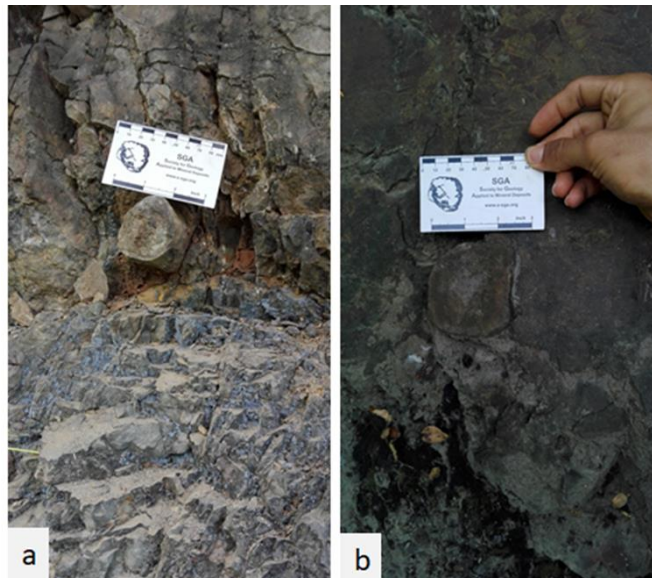


Figura 30. Fotografías (a) y (b) afloramientos presentes en el desvío Bucaramanga – Bocas, evidencia de fragmentos de troncos en afloramientos de la Formación Bocas, con un diámetro aproximado de 4 cm.



Figura 31. Fotografía de la muestra CC8-M1. Arenita de grano muy fino con alto contenido de hojas y tallos carbonizados.



Figura 32. Fotografía de la estación CC12. Litológicamente es una intercalación de areniscas de grano fino-medio de color gris claro-oscuro, lodolitas calcáreas fisiles de color negro-marrón algunas con alto contenido de materia orgánica y presencia de fósiles y limolitas calcáreas de color gris oscuro.



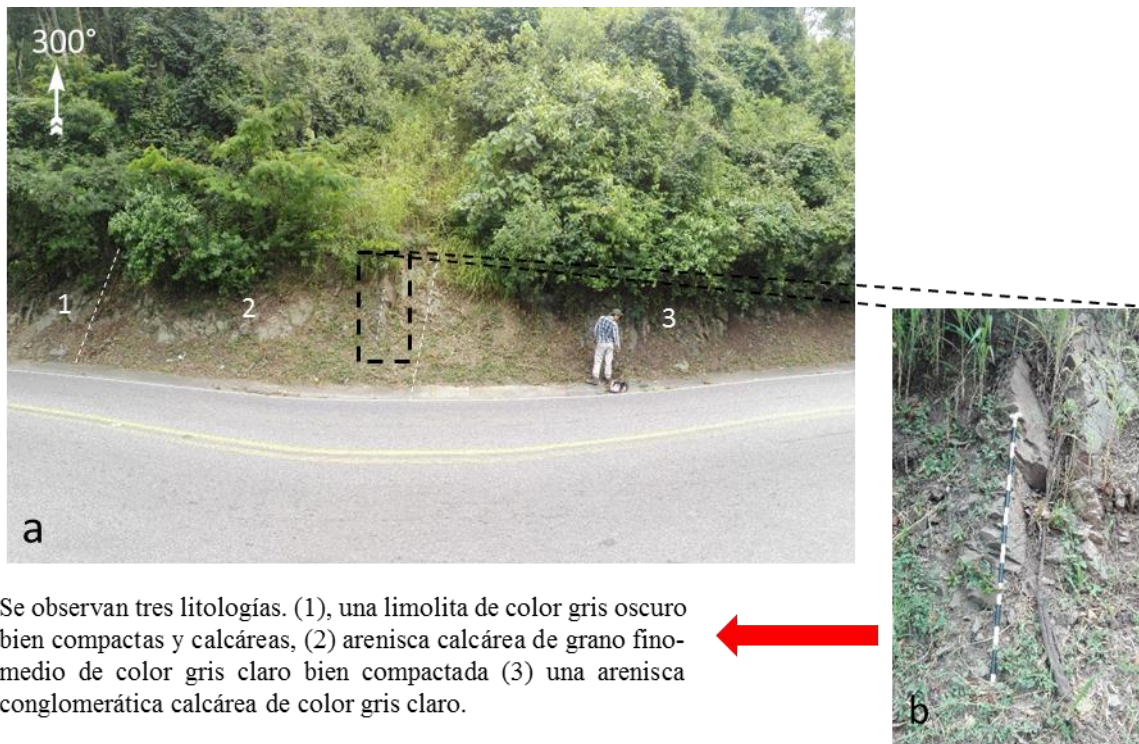
Figura 33. Fotografía de la estación CC16, afloramiento de la Formación Bocas en la quebrada La Carpintera. Litológicamente se tiene una intercalación de limolitas negras compactas silíceas con niveles más delgados de limolitas negras más fisiles.



Figura 34. Fotografía de la estación CC-17, afloramiento ubicado en la quebrada La Carpintera. Micropliegues en limolitas silíceas de color gris de la Formación Bocas.

7.2.3 Formación Jordán (Jj). La edad asignada para esta unidad se da por medio de la relación estratigráfica la cual la pone entre el Jurásico inferior a medio. El espesor varía entre 300 y 660m según Ward, et al. (1973).

Son escasos los afloramientos de la Formación Jordán en la zona de estudio; están principalmente ubicados en el margen izquierdo de la vía Bucaramanga – Rionegro, litológicamente se encuentran areniscas conglomeráticas calcáreas de color gris verdoso, areniscas rojizas ligeramente calcáreas de grano fino intercaladas con niveles de limolita calcárea gris oscura bien compactas.



Se observan tres litologías. (1), una limolita de color gris oscuro bien compactas y calcáreas, (2) arenisca calcárea de grano fino-medio de color gris claro bien compactada (3) una arenisca conglomerática calcárea de color gris claro.

Figura 35. Fotografía de la estación CC46. (a) Afloramiento representativo de la Formación Jordán sobre el margen izquierdo de la vía Bmga-Rionegro, unos 400m delante de “el cero”. (b) Zoom de litología 2. Dato de estratificación $21^{\circ}/70^{\circ}$. Escala, bastón de Jacob.



Figura 36. Fotografía de la estación CC46. Afloramiento de la Formación Jordán sobre el margen izquierdo de la vía Bmga-Rionegro, unos 400m delante de “el cero”. dato de estratificación $21/7$. Círculo azul demarca punto de muestreo CC46-m1.

7.3 Unidades litodémicas

7.3.1 Batolito de Rionegro (Jgd). Según Ward, et al. (1973) está conformada por una granodiorita gris generalmente porfirítica. Esta granodiorita tiene varias inclusiones del Neis de Bucaramanga y su borde sur es una extensa zona mezclada. Edad asignada del Jurásico inferior a medio.

En el área de estudio los afloramientos presentes de esta roca se ven altamente afectados estructuralmente por la Falla Bucaramanga generando una alta fracturación y así mismo favoreciendo un proceso severo de meteorización. Fue descrito en el área de estudio como un granitoide leucocrático con hornblenda, (alterando a clorita), plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico (alterando a caolín), textura holocristalina, inequigranular, el tamaño promedio de los cristales: medio a grueso; en sectores sobresalen cristales de K-Fds de tamaño muy grueso. Presenta orientación de los cristales, se encuentra muy fracturado y meteorizado, es deleznable y se presentan múltiples planos estriados en algunos afloramientos.

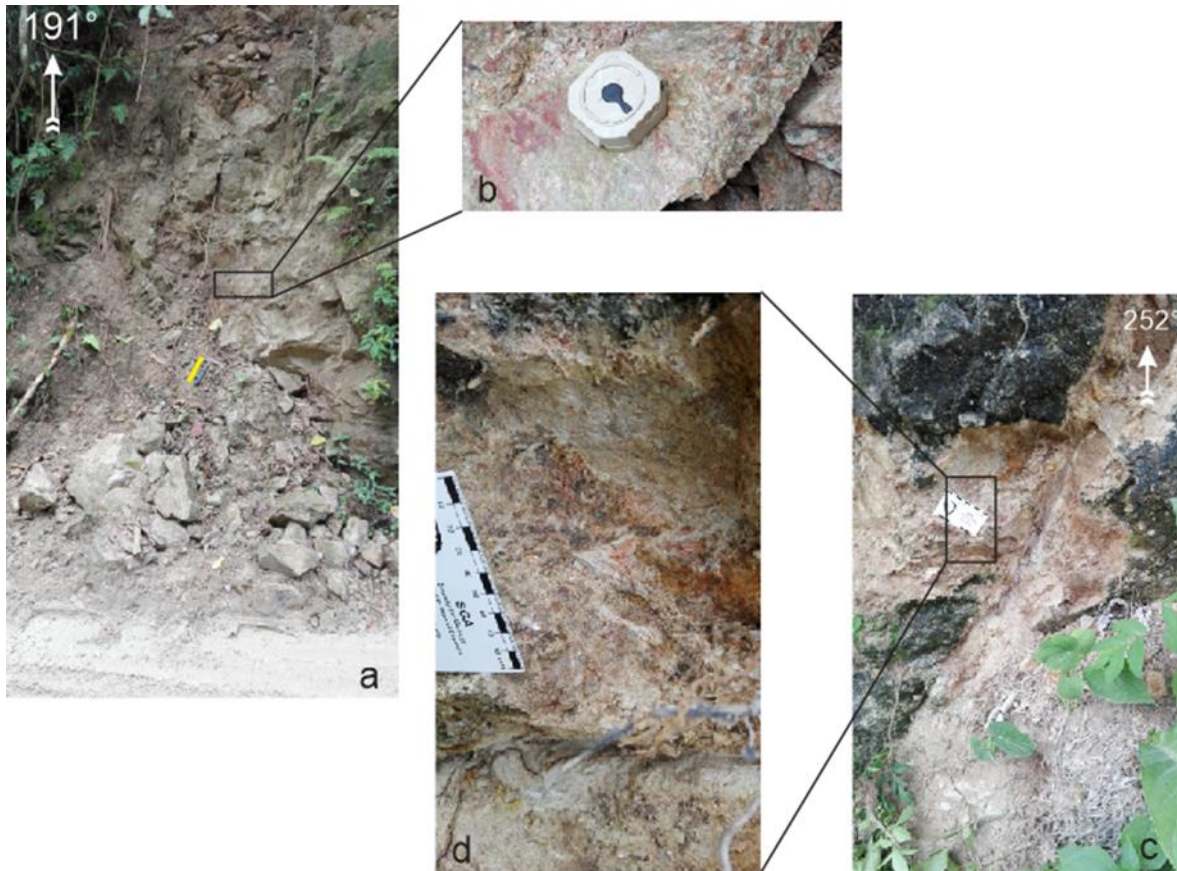


Figura 37. Fotografía de los afloramientos de la unidad Jgd. (a) Estación CC4. El estado de deformación causado por la falla Bucaramanga en esta unidad es muy alto, lo que favorece su meteorización química y por tanto su pérdida de compacidad. Escala martillo geológico (línea amarilla = 33cm); (b) Zoom mostrando la coloración rojiza de la muestra asociada al alto contenido de feldespatos alcalinos; (c) Punto de control 7. En este sector, la roca preserva menor grado de deformación mecánica, pero se encuentra enmascarada por capas de Materia orgánica. (d) Al descubrir una superficie de roca fresca se observa una disminución en la cantidad de K-fds y anfíboles; se distinguen algunos óxidos (de hierro) aumento relativo de plagioclasas, respecto a CC4.



Figura 38. Fotografía de la estación CC6, dentro del título minero AGM-151. Afloramiento de la unidad Jpg altamente meteorizado y afectado estructuralmente.

7.3.2 Dique andesítico. Se encuentran aflorando sobre la sobre la vía a Rionegro, después de “el cero” sobre el margen izquierdo de la carretera. El contacto entre esta unidad y la Formación Jordán no fue explícitamente visto en campo debido a la abundante vegetación cerca del límite entre este cuerpo y la dicha formación, además de algunos derrumbes.

La continuidad de la Formación Jordán se ve truncada hacia el norte por esta unidad, su extensión lateral se controló sobre la Vía a Rionegro. Este cuerpo ígneo está mencionado en el cuadrángulo H12, pero no está debidamente cartografiado. (Ver Discusión)

Litológicamente se tiene una Andesita porfirítica, con una textura vesicular. Compuesta por fenocristales de Calcita, Piroxenos y Plagioclasas, se observa Clorita en varios sectores y algunas

Epidotas de alteración, su matriz es microcristalina por lo tanto no es posible distinguirla a escala macroscópica.



Figura 39. Fotografía de la estación CC31. Andesita con textura porfirítica. (a) Afloramiento bien preservado de la unidad. Pese a que se encuentra adyacente a la Formación Jordán no fue posible ver el contacto entre estas dos unidades. Escala, línea roja 1,5m. b) Zoom de la textura amigdaloides, los cristales de mayor tamaño están compuestos predominantemente por calcita, y la matriz es microcristalina (silicatada pero, mineralógicamente indiferenciable a escala mesoscópica).

7.4 Depósitos Recientes

7.4.1 Cuaternario (Qal). Esta unidad está compuesta por depósitos no consolidados de aluvión, que son considerados del Holoceno según Clavijo y Royero (2001). Para este caso están

asociados a los depósitos aluviales del río negro, quebrada La Carpintera y quebrada los Micos en los cuales se observan rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias.



Figura 40. Fotografía de la estación CC17. Qal. Depósito aluvial en el margen izquierdo de la quebrada La Carpintera. TrB, limolitas gris oscuro de la Formación Bocas, casi verticalizadas y parcialmente plegadas hacia la parte central de la fotografía.

8. Resultados y análisis

8.1 Cartografía

En la Figura 46 se muestra el mapa de estaciones de campo donde además se señalan los puntos donde se levantaron las columnas estratigráficas (Ver Apéndice A y C); sin embargo, el principal producto generado en esta fase es el mapa geológico a escala 1:10.000 el cual se muestra en la Figura 41 y puede ser consultado de forma detallada en el Apéndice C – Mapa geológico.

En esta fase del proyecto se cartografió un total de 4,8 Km², en donde se definieron 6 unidades litoestratigráficas ULE que fueron correlacionadas con las siguientes formaciones:

- Formación Diamante (PCd)
- Formación Bocas (TRb)
- Formación Jordán (Jj)
- Formación batolito de Rionegro (Jgd)
- Dique Andesítico (an-p)

Se tomó como base la nomenclatura utilizada en el cuadrante H-12, y como evidentemente las escalas de trabajo en cada caso dan un determinado alcance en el grado de detalle, la correspondencia no es total. Por lo tanto, estos aspectos están expuestos en el capítulo **9. Discusión**; mientras que los rasgos estructurales y estratigráficos de cada formación están compilados en el capítulo **7. Geología local**.

Mapa de Estaciones

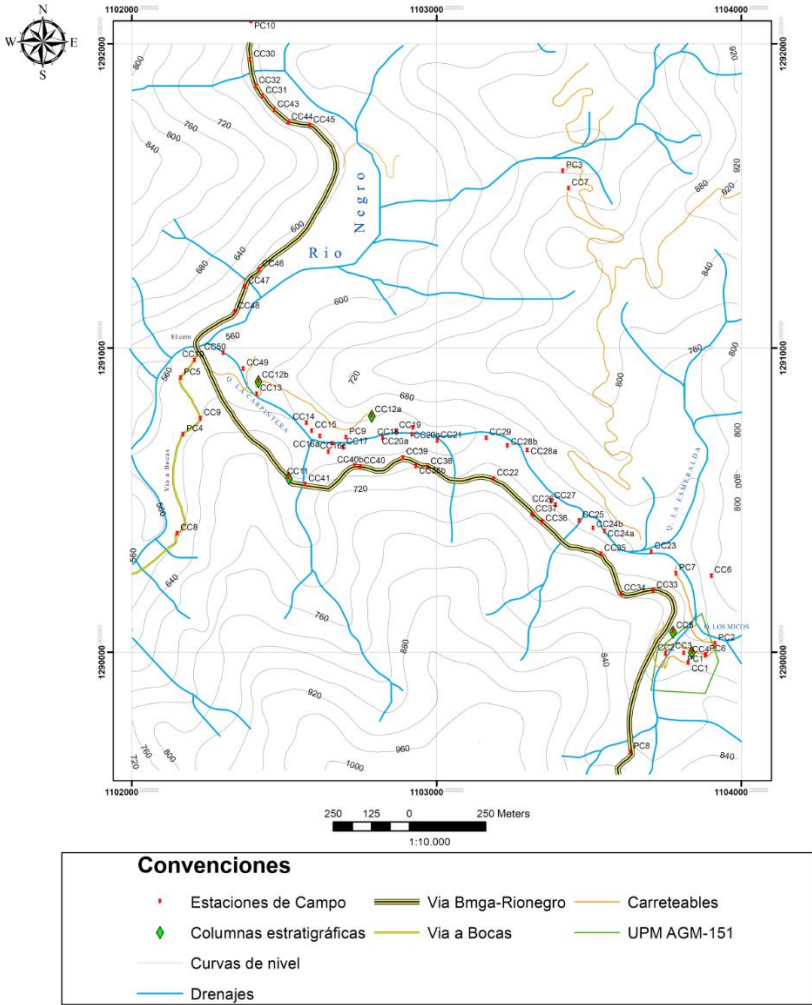


Figura 41. Mapa de estaciones de campo, demarcando además ubicación de los puntos donde se levantaron columnas estratigráficas. (Ver Apéndice A).

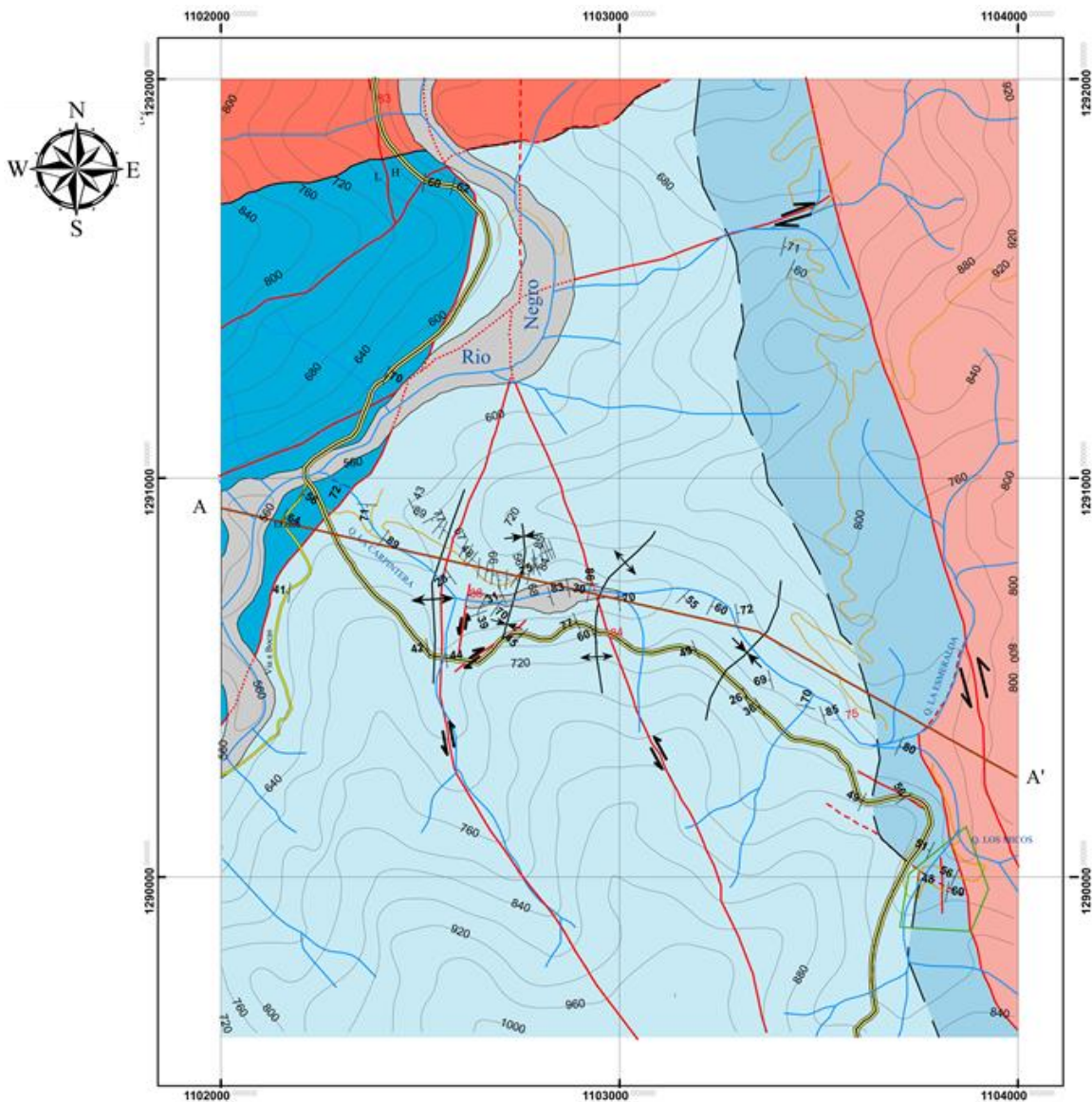


Figura 42. Mapa geológico, escala 1:10.000. Ver Apéndice C.

8.2 Petrografía

8.21 Formación Diamante. En muestra de mano las dos muestras sacadas de la Formación Diamante fueron clasificadas como calizas cristalinas. El grado de neomorfismo que se evidencia en estas muestras es tan alto que muchos de sus componentes originales son sombras o fantasmas

de fósiles (preferencialmente equinodermos). Ambas muestras se encuentran casi totalmente esparitizadas; por tanto, no se realizó conteo de puntos.

8.2.1.1 Sección delgada CCI-M1. Bioesparita no seleccionada (caliza tipo I) según Folk (1974), presenta un armazón compuesto por bioclastos de distintos tamaños que varían entre 0.03 mm a 0.09 mm, los bioclastos presentes están completamente formados por esparita.

También se observan cristales de microesparita y pseudoesparita (variación de tamaño limo medio a limo grueso) los cuales en su mayoría pudieron ser generados por neomorfismo de la matriz. A pesar de que las estructuras originales de los bioclastos han sido parcialmente borradas, se alcanzan a distinguir fragmentos equinodermos, fragmentos de conchas de moluscos (algunas deformadas) y algunos pellets que presentan un tamaño promedio de 0.05 mm.

A comparación de la muestra CC5-M1 esta presenta una menor cantidad de bioclastos y un mayor contenido de fracturas las cuales han sido también rellenadas por calcita. Algunas de estas venas cortan los bioclastos y varían de grosor entre 1.52 mm a 0.010 mm.

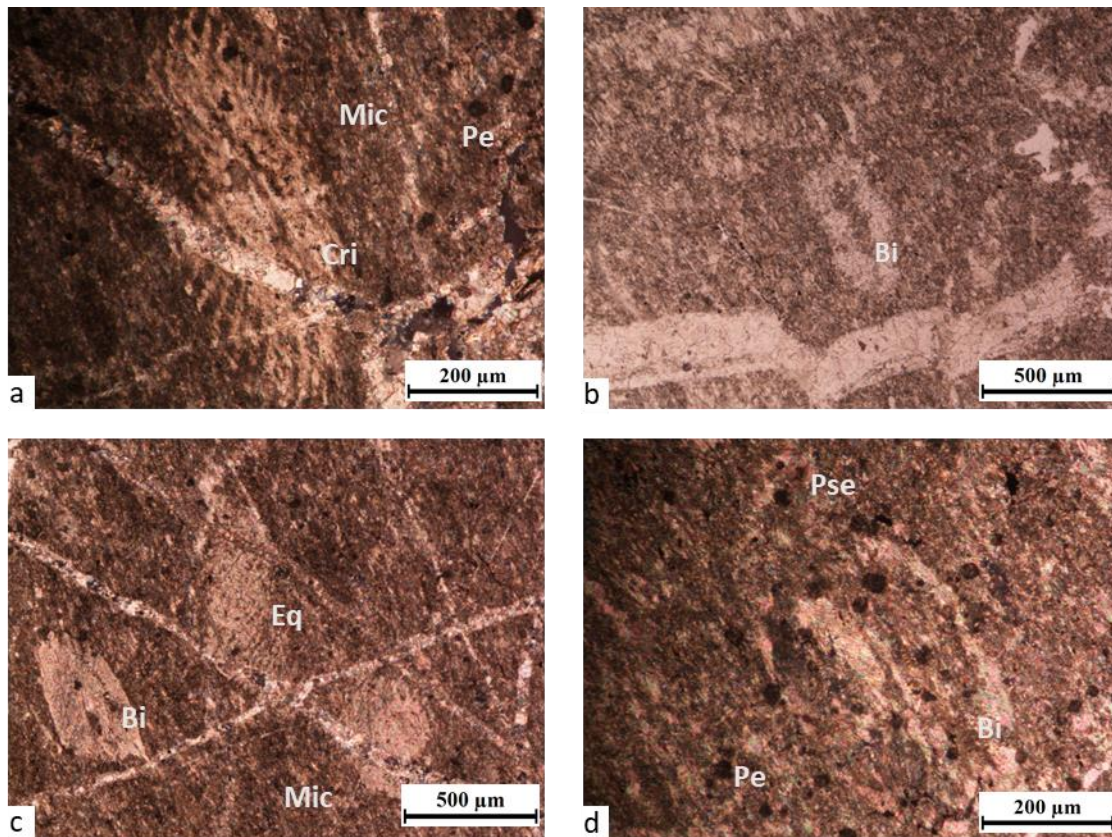


Figura 43. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1. Cri, Crinoidea; Mic, Micrita; Pe, Peloide; Bi, Bioclasto; Eq, Equinodermo; Pse, Pseudoesparita. (a) Crinoideo en un estado de recristalización bastante alto, sin embargo, se logra diferenciar su estructura esquelética propia, fotografía en nicoles cruzados. (b). Bioclastos, algunos deformados, fotografía en nicoles paralelos. (c) Fragmento de equinodermo, se observa una alta presencia de venas de calcita las cuales cortan los bioclastos presentes en la muestra, fotografía en nicoles cruzados. (d) Bioclastos altamente recristalizados y evidencia de cristales de pseudoesparita, fotografía en nicoles cruzados

8.2.1.2 Sección delgada CC5-MI. Bioesparita no seleccionada (caliza tipo I) según Folk (1974), presenta un armazón compuesto por bioclastos de distintos tamaños los cuales varían entre arena fina a limo fino; estos presentan una recristalización a esparita (esparitización) debido al neomorfismo presente en la muestra. A pesar de que las estructuras internas de los bioclastos fantasmas han sido borradas, se logran distinguir fragmentos de equinodermos, valvas fracturadas de moluscos, foraminíferos bentónicos y algunos peloides. (Ver Figura 44)

Lo que alguna vez pudo constituir la matriz está compuesta en su gran mayoría por cristales de microesparita y pseudoesparita (varían entre el tamaño de limo medio a limo grueso) los cuales fueron formados debido al neomorfismo agradante que sufrió la micrita presente anteriormente en la muestra.

La muestra presenta varias fracturas las cuales varían de grosor entre 2.2 mm a 0.0019 mm y han sido rellanadas por fluidos carbonatados.

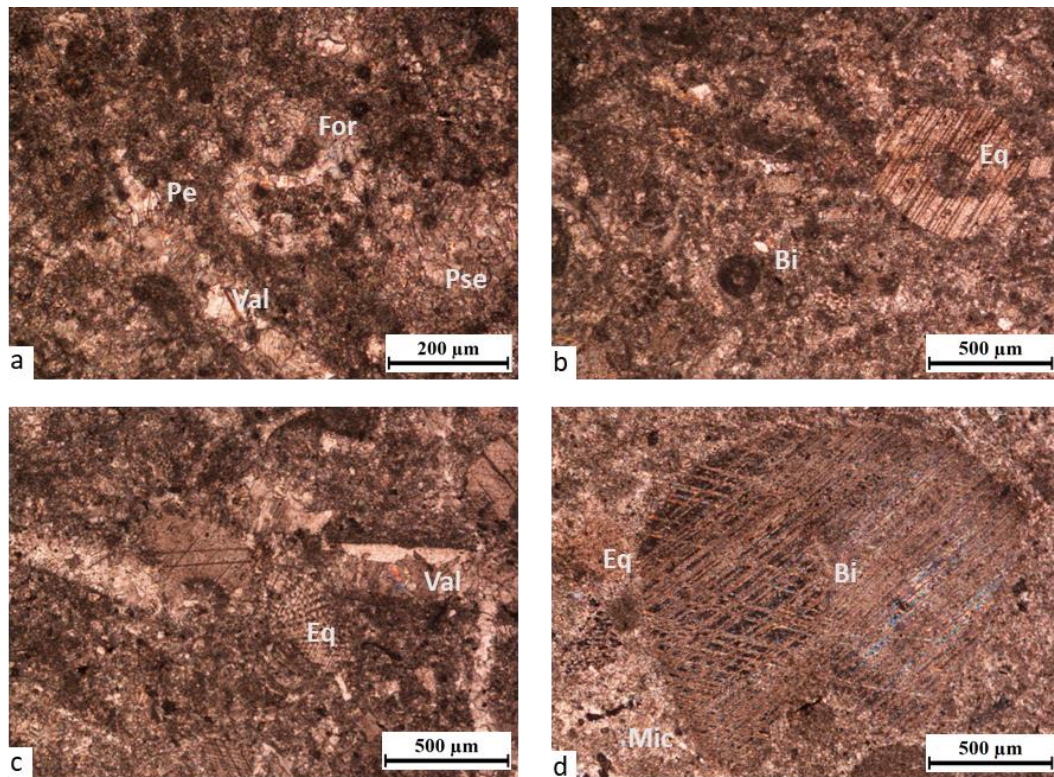


Figura 44. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. For, Foraminífero; Pe, Peloides; Val, Valvas fracturadas de moluscos; Eq, Equinodermo; Bi, Bioclasto; Pse, Pseudoesparita; Mic, Micrita. (a) Estructura clara de un foraminífero ya recrystalizado, se observan también cristales de pseudoesparita y algunos peloides, fotografía en nicols cruzados. (b) Fragmento de equinodermo altamente recrystalizado, fotografía en nicols cruzados. (c) Fragmentos de equinodermos y valvas recrystalizadas, fotografía en nicols cruzados. (d) Bioclasto recrystalizado de tamaño considerable, rodeado de fragmentos de equinodermo, fotografía en nicols cruzados.

8.2.2 Formación Bocas. En muestra de mano, estas rocas fueron clasificadas como calizas mudstone, sin embargo, el detalle de la petrografía permite esclarecer que el contenido de Aloquímicos y material siliciclástico en estas rocas es, en definitiva, muy relevante. Por tanto, dado que el objetivo del trabajo es determinar un potencial económico basado en el contenido de carbonatos, se realizó un conteo de puntos (Ver Tabla 1 y 2).

Tabla 1.

Tabla de discriminación composicional, donde se muestra el resumen del conteo de puntos para la sección delgada CC12-M1.

Tabla de Discriminación composicional						
Muestra: CC12- M1						
Componentes		Puntos- parciales	Puntos- Totales	%	Σ %	
Carbonatos	MICRITA	97	356	27,25	59,83	
	ESPARITA	66		18,54		
	BIOCLASTOS	50		14,04		
Terrígenos	Materia orgánica	27		7,58	40,17	
	Fragmentos de roca	3		0,84		
	Cuarzo	98		27,53		
	Plagioclasa	9		2,53		
	Feldespato-k	6		1,69		
Total					100,00	100,00

Tabla 2.

Tabla de discriminación composicional, donde se muestra el resumen del conteo de puntos para la sección delgada CC12-M1.

Tabla de Discriminación composicional						
Muestra: CC12- M2						
Componentes		Puntos- parciales	Puntos- Totales	%	Σ %	
Carbonatos	MICRITA	87	292	29,79	55,82	
	ESPARITA	43		14,73		
	BIOCLASTOS	33		11,30		
Terrígenos	Materia orgánica	13		4,45	44,18	
	intraclastos	8		2,74		
	Cuarzo	96		32,88		
	Plagioclasa	3		1,03		
	Feldespato-k	9		3,08		
Total					100,00	100,00

8.2.2.1 Secciones delgadas CC12-M1 y CC12-M2. La composición global de ambas muestras es muy similar, por lo tanto, a continuación, se describen sus componentes:

a. Bioclastos

Los bioclastos predominantes son valvas desarticuladas y fragmentos de conchas de ostrácodos, cuyos tamaños de grano fluctúan desde limo grueso a arena fina. También se encuentran fragmentos de conchas de moluscos (Bvv). Todos estos bioclastos, generalmente se encuentran rellenos de esparita. Las conchas que permanecen articuladas, están siendo rellenas principalmente por micrita y microesparita. También se encontraron algas (probablemente verde azules) y materia orgánica indiferenciada. En general, los bioclastos tienden a conservar una orientación paralela de su eje más largo a la laminación interna de la muestra.

b. Terrígenos

El principal componente terrígeno en la muestra es el cuarzo, su tamaño de grano varía desde limo medio hasta arena fina, la geometría de las partículas es preferencialmente subangular, aunque localmente varia hasta ser subredondeada. No se observa un predominio de esfericidad. Las plagioclasas son de tamaño predominantemente limo grueso, son angulares y evidencian alteración a sericita; muy marcada en sus bordes, pero incipiente en su interior. Los cristales de feldespatos presentan características de tamaño y forma con las plagioclasas, pero estos tienen alto grado de alteración.

c. Intraclastos

Presentan formas irregulares, tamaño de grano arena media, su contraste textural es muy marcado respecto a los componentes principales de la muestra. Es posible distinguir algunos componentes internos tamaño limo medio a grueso.

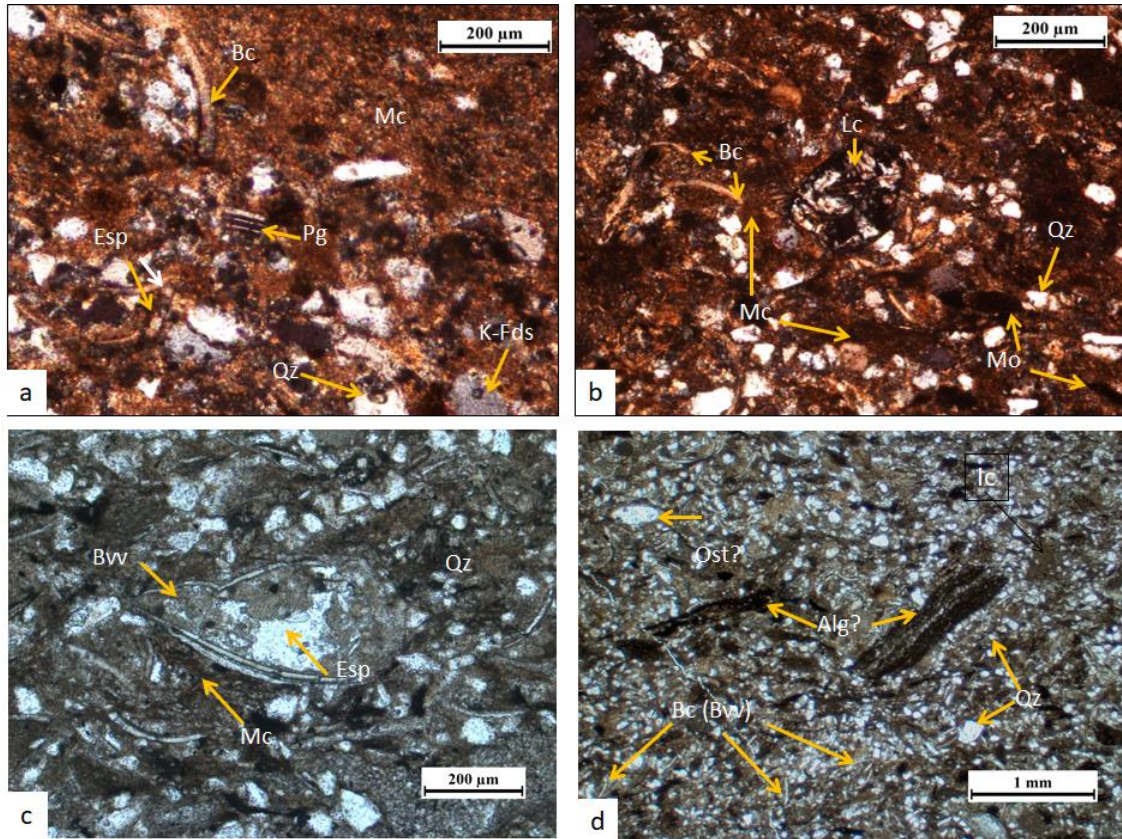


Figura 45. Fotografía de la sección delgada CC12-M1. Mc, micrita; Esp, Esparita, Qz, cuarzo; Pg, Plagioclasa; Ost, Ostracodos; Inc, intraclasto; Lc, Litoclasto; Bc, bioclastos, Pld, Peloides; Plt, Pelets; Bvw, Bivalvos; Mo, Materia orgánica indiferenciada. (a) Aloquímicos embebidos en matriz micrítica, que presenta esparitización en algunos sectores. Se observa cristal de plagioclasa alterado a sericita en los bordes. (b) Litoclasto de origen volcánico, subesférico y redondeado. (c) Bivalvo Articulado, relleno parcialmente de micrita y presentando esparitización. (d) Fragmentos longitudinales de algas (probablemente verde azules).

d. Litoclastos volcánicos

Son redondeados y no esféricos; su tamaño varía de arena muy fina hasta arena media y son más abundantes hacia el tope de la muestra.

e. Ortoquímicos

La micrita es el principal componente de la matriz. En varios sectores se observó la presencia de crecimiento de cristales de calcita mayores a 10 micras, es decir, desarrollo de pseudoesparita como consecuencia del neomorfismo. No se realizó una discriminación detallada de los tipos de espar dado los objetivos del trabajo y los altos niveles de experiencia y complejidad que este procedimiento demanda.

f. Accesorios

Los circones que presentes no superan el tamaño de grano limo grueso y exhiben formas redondeadas y esféricas. La alteración de feldespatos plagioclasas y potásico da paso a la formación de sericita y caolinita. Los fragmentos de mica blanca son muy escasos y se restringen a tamaño limo medio.

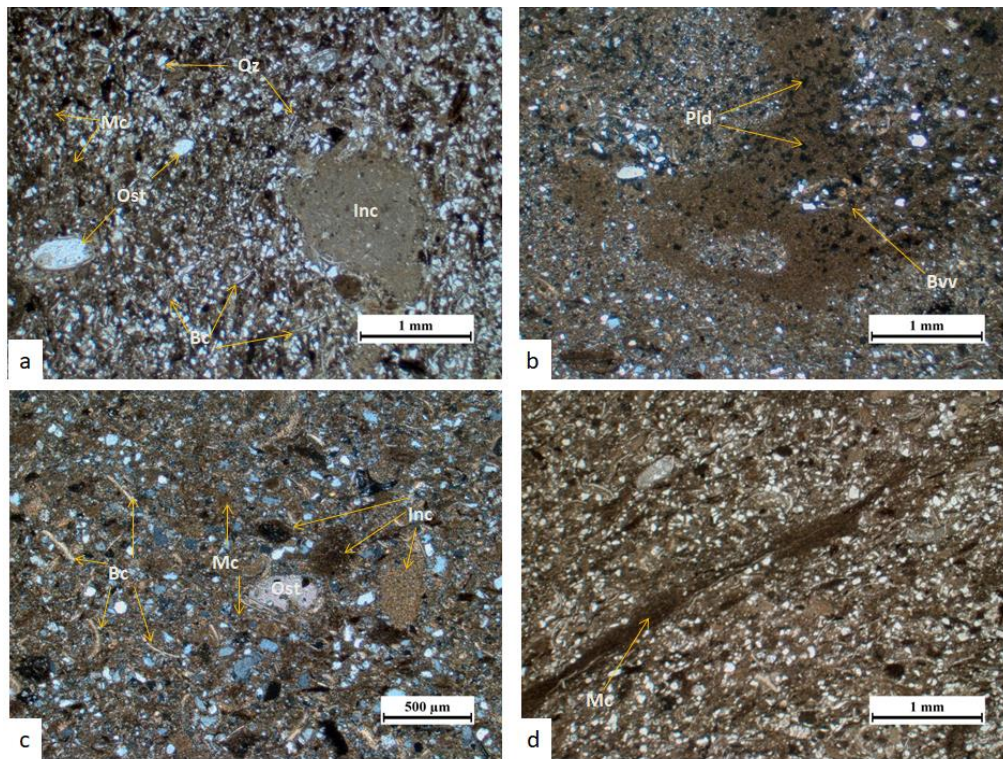


Figura 46. Microfotografía de la sección delgada C12-M2. Mc, micrita; Qz, cuarzo; Ost, Ostracodos; Inc, intraclasto; Bc, bioclastos, Pld, Peloides; Plt, Pelets; Bvv, Bivalvos. (a) Intraclasto con fragmentos internos tamaño limo. (b) Concentración de pellets. Se observa bivalvo recrystalizado y articulado dentro de una matriz tamaño limo. (c) Distribución aleatoria de los componentes de mayor tamaño, Bc, (conchas desarticuladas de bivalvos y ostracodos); Ic, subredondeados, con partículas tamaño limo al interior. (d) Desarrollo de láminas de micrita y orientación de fragmentos alargados de materia orgánica.

Utilizando la clasificación de rocas mixtas propuesta por Mount (1985) y los porcentajes obtenidos en el conteo de puntos y mostrados en la Tabla 1 y 2, las dos muestras fueron clasificadas como *Micrita arenosa*. Texturalmente, según Dunham (1962) se clasifican como *Wackstone de ostrácodos*.

8.2.3 Dique Andesítico.

8.2.3.1 Sección delgada CC30-M1: Roca ígnea máfica de afinidad andesítica la cual presenta textura vesicular, matriz compuesta principalmente por cristales de tamaño fino de plagioclasa y augita. La muestra presenta algunos fenocristales de plagioclasa en donde es clara la expresión de la macla polisintética.

Esta textura vesicular o amigdaloides se caracteriza por presentar calcita como principal mineral que rellena dichas cavidades. Esta característica se asocia a un evento metesomático posterior, generando a su vez minerales de baja T° como zeolita, calcita, clorita y algunas epidotas.

Como minerales accesorios se encontraron cristales de hematita, óxidos de hierro y algunos minerales opacos que fueron formados en el primer evento paragenético de la roca.

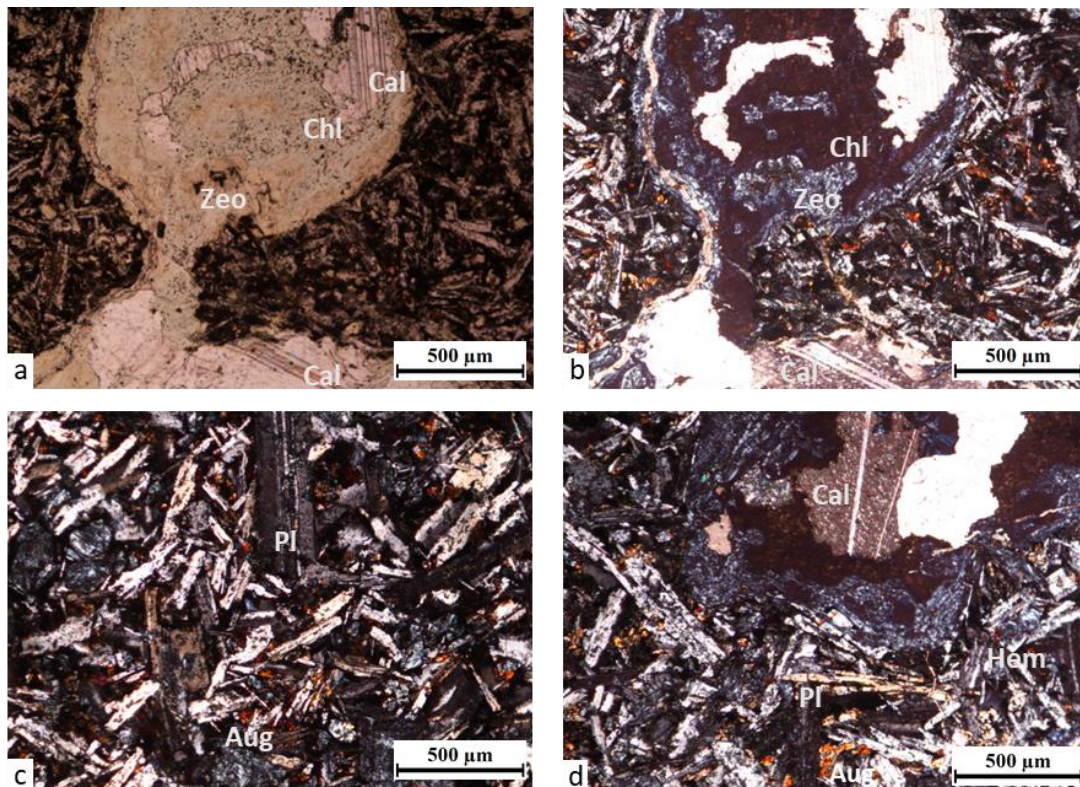


Figura 47. Microfotografía de la sección delgada CC30-M2. Zeo, Ceolita; Chl, Clorita; Cal, Calcita; Pl, Plagioclasa, Aug, Augita, Hem, Hematita. Evidencia clara de la textura amigdalara en la roca. (a) Fotografía en nicols paralelos y (b) Fotografía en nicols cruzados; textura amigdalara clara, rellena por minerales secundarios como ceolitas, clorita y calcita, a su alrededor se observa la matriz de la roca compuesta por plagioclasas y augitas principalmente. (c) Cristales de plagioclasa con un hábito tabular y alargado, fotografía en nicols cruzados. (d) Amigdala rellena por calcita y ceolita, rodeada por la matriz de la roca, fotografía en nicols cruzados.

8.3 Análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Se seleccionaron entre dos y tres zonas para analizar en las secciones en base a la composición determinada a partir de la petrografía. Dentro de dichas zonas, se seleccionaron áreas y puntos representativos para obtener un diagrama cualitativo de la composición elemental de la muestra. Los cambios composicionales en el MEB se identificaron mediante contrastes de color y opacidad en la imagen.

8.3.1 Sección Delgada CC1-M1 (Fm. Diamante).



Figura 48. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC1-M1.

- CC1-M1-Z1

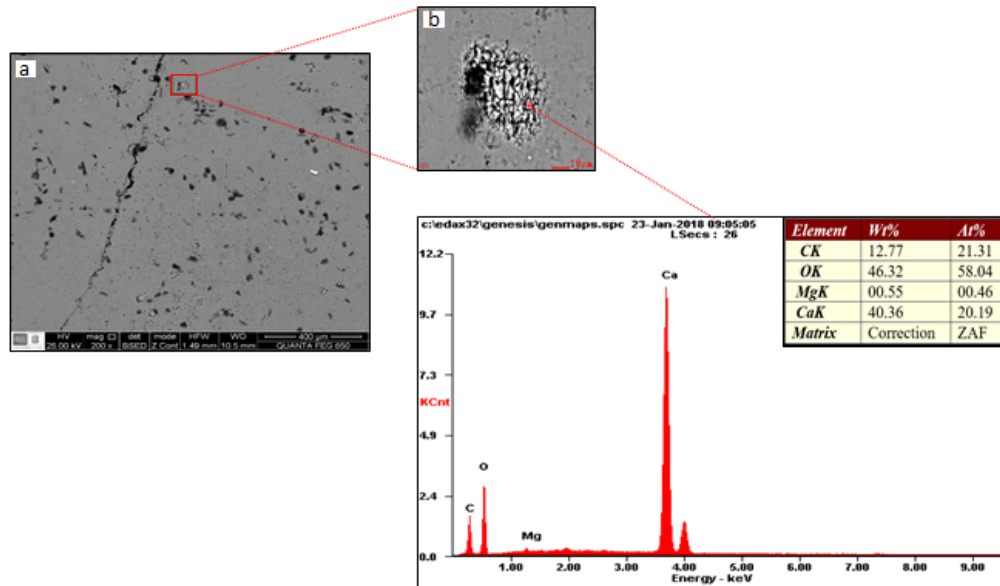


Figura 49. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1. (a) Imagen de la zona 1. (b) Área representativa seleccionada y análisis puntual a un cristal con su respectivo resultado.

En la Figura 49 se observa la homogeneidad composicional que presenta la muestra debido a que casi en su totalidad hay una tonalidad grisácea, también nos muestra que algunas fracturas que están presentes en la roca no han sido rellenadas en su totalidad. De la Figura 49a se seleccionó el área de la Figura 49b en donde se observa una superficie de disolución, el cual resalta con un color blanco y un claro cambio textural en su superficie, a este poro se le realizó un análisis puntual mostrando en su composición un alto contenido de Ca y en menor proporción Mg lo que llevaría más a un cristal de Dolomita, evidenciando así procesos leves de dolomitización en la muestra.

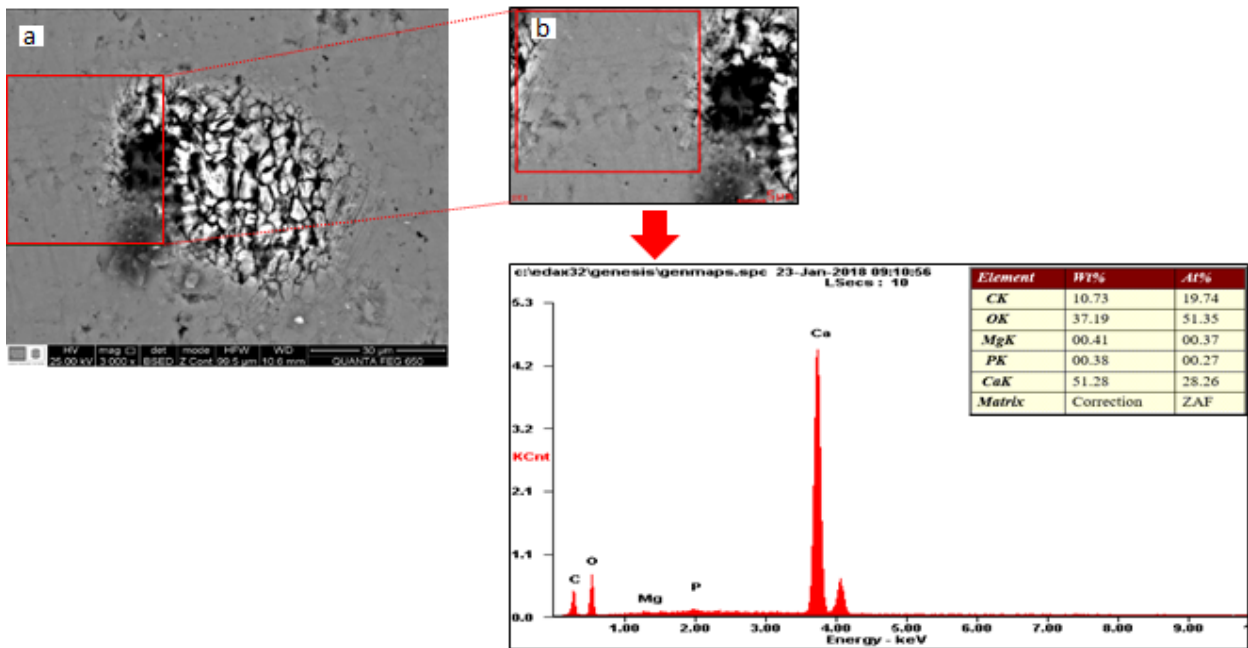


Figura 50. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1. Imágenes y resultados del análisis realizado para el área seleccionada de la zona 1 con un mayor aumento.

En la Figura 50a se seleccionó un área representativa de la imagen, se observa en los resultados una alta presencia de Ca y otros elementos como Mg y P en menor proporción lo que nos indica que a pesar del cambio de tonalidad la muestra sigue mostrando una homogeneidad composicional en ese sector y reflejando la presencia de Calcita.

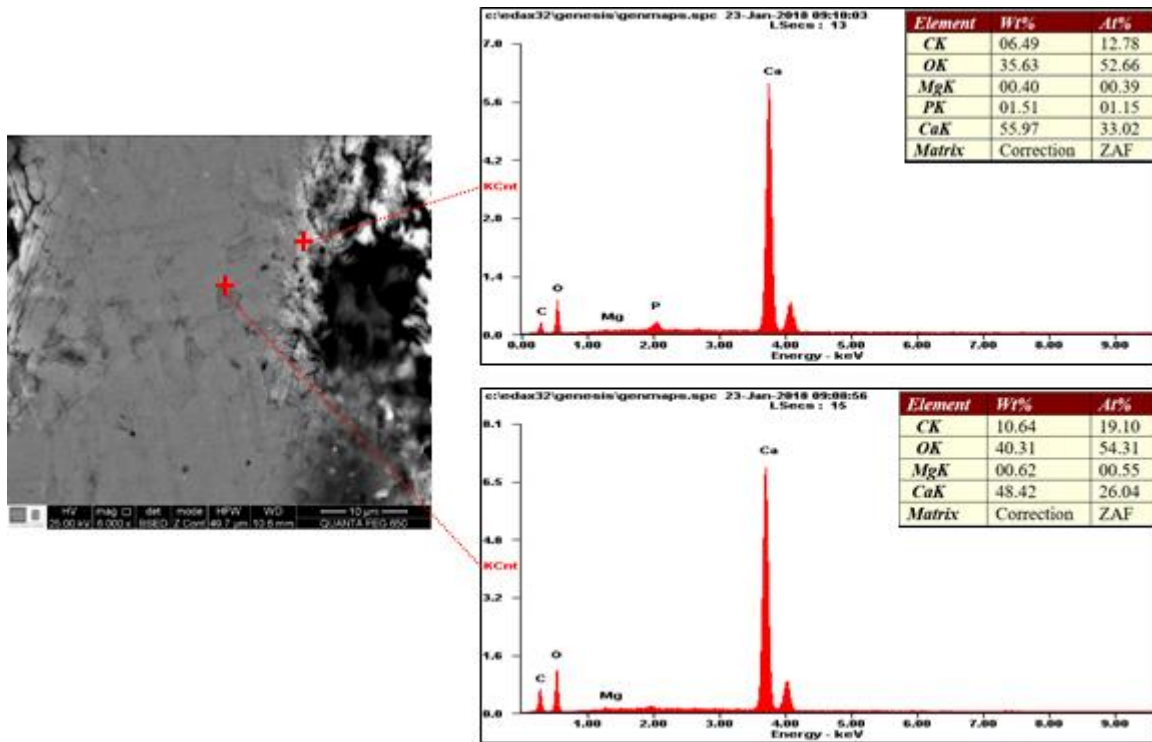


Figura 51. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1. Análisis puntuales realizados con más detalle con sus respectivos resultados.

La Figura 51 se confirma lo anterior dicho de esta área seleccionada por medio de análisis puntuales, seleccionando así solo la tonalidad grisácea que muestra la imagen de la roca y un borde del poro que presenta un color blanco. Las gráficas nos muestran una composición muy similar entre ambos puntos y resaltan el alto contenido de Ca.

- CC1-M1-Z2

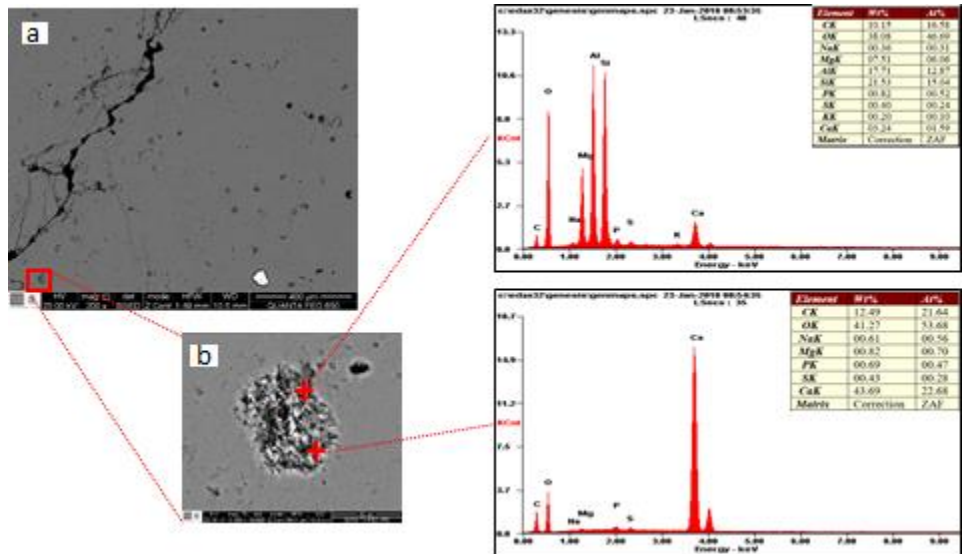


Figura 52. Microfotografía de la sección delgada CC1-M1. (a) Zona 2 y área representativa a analizar. (b) Resultados de dos análisis puntuales a un cristal ubicado en el área de la figura (a).

En la Figura 52a se observa otra fractura en la roca que no presenta ningún tipo de relleno lo cual favorece la porosidad de la roca, respecto a su tonalidad se presenta bastante homogénea debido a que es poco el contraste de color en la imagen. En la Figura 52b se observa un poro en el cual se realizan dos análisis puntuales para determinar la variedad de su composición, en el punto superior se observa un alto contenido de elementos como Si, Al y Mg lo que indica que este cristal probablemente tiene otra procedencia y el punto inferior que da con alto contenido de Ca que indica un cristal de Calcita.

8.3.2 Sección delgada CC5-M1 (Fm. Diamante).

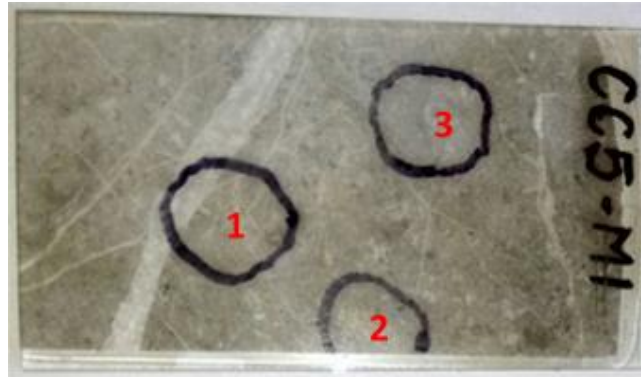


Figura 53. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC5-M1.

- CC5-M1-Z1

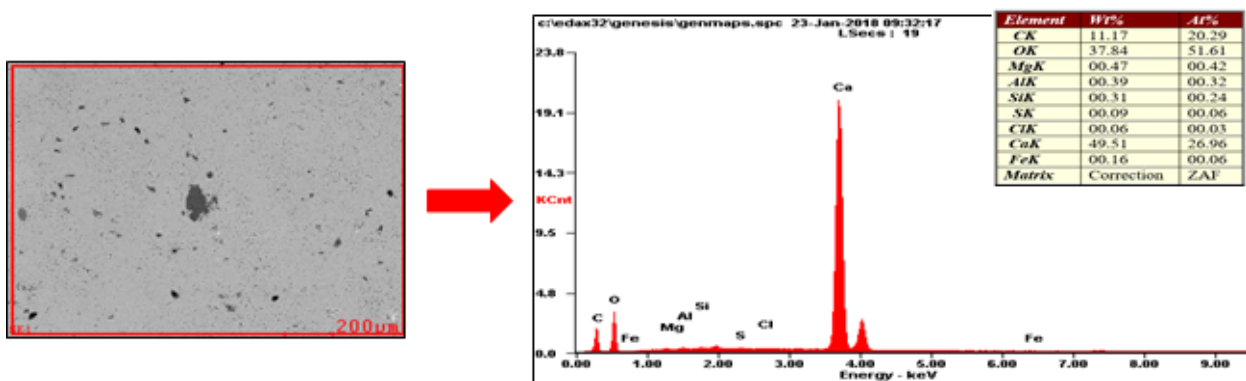


Figura 54. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados del análisis realizado para el área seleccionada de la zona 1.

Se realizó un análisis composicional de toda el área que abarca la imagen de la zona 1, el resultado refleja un alto contenido de Ca y la presencia de otros elementos en menor proporción, la imagen refleja la homogeneidad composicional que tiene la roca con una tonalidad grisácea clara y otros puntos con un gris más oscuro, esto nos indicaría que casi en su totalidad existe la presencia de Calcita, Dolomita y quizás algunos fragmentos de cristales de Cuarzo.

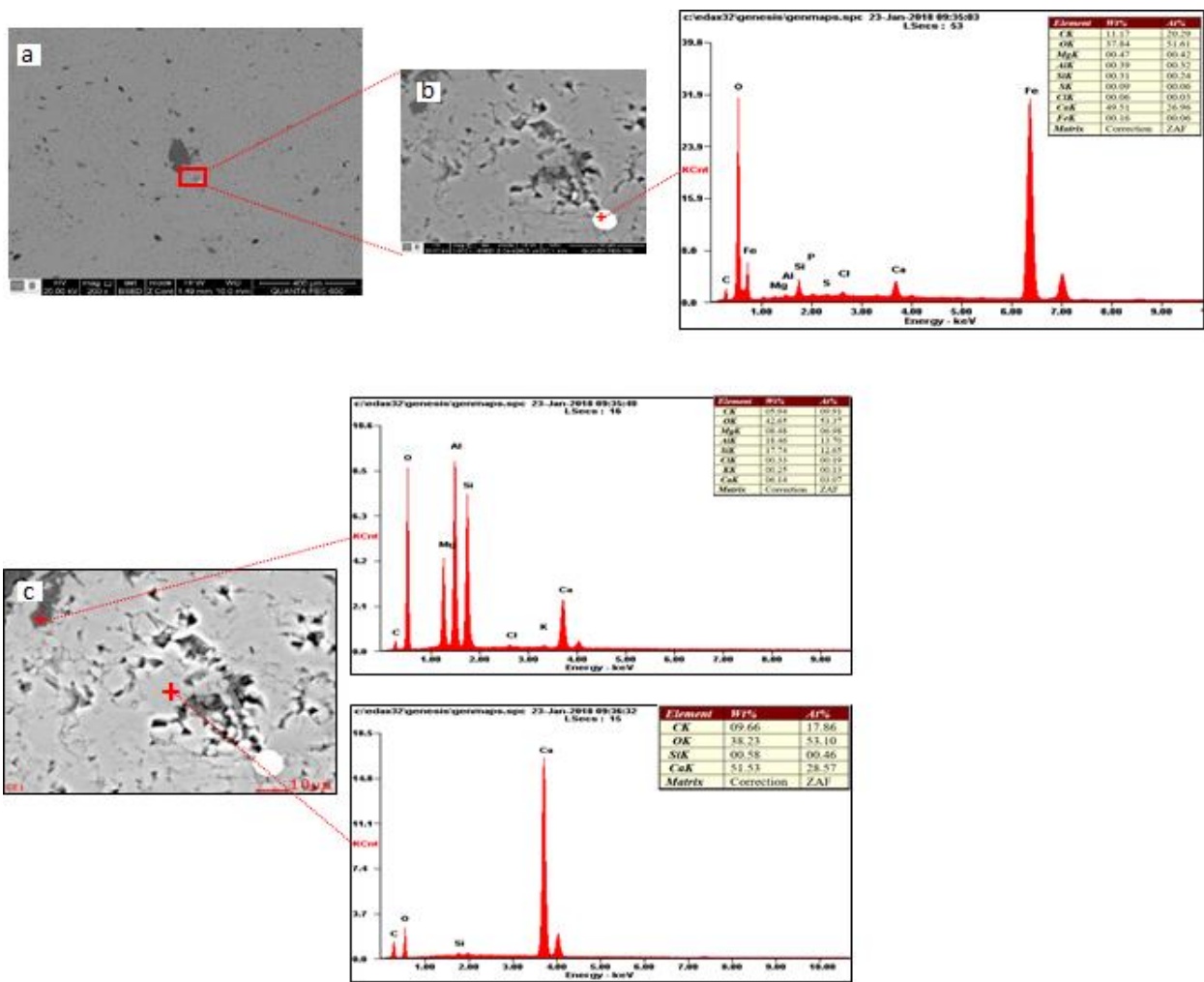


Figura 55. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados de los análisis puntuales realizados para el área seleccionada de la zona 1 con mayor aumento.

Se realizó un zoom en la zona 1 de la sección para analizar puntualmente las partes en que se observa un cambio en la tonalidad de la imagen, para la Figura 55b se observa un punto blanco el cual refleja un alto contenido de Fe el cual es poco usual en la composición normal de la roca, en la Figura 55a se realizan dos análisis puntuales en el cual uno arroja un alto contenido de Mg, Al, Si y en menor proporción Ca lo cual se puede inferir la presencia de Dolomita y en el otro punto se observa un alto contenido de Ca que es la composición más abundante en ella.

- CC5-M1-Z2

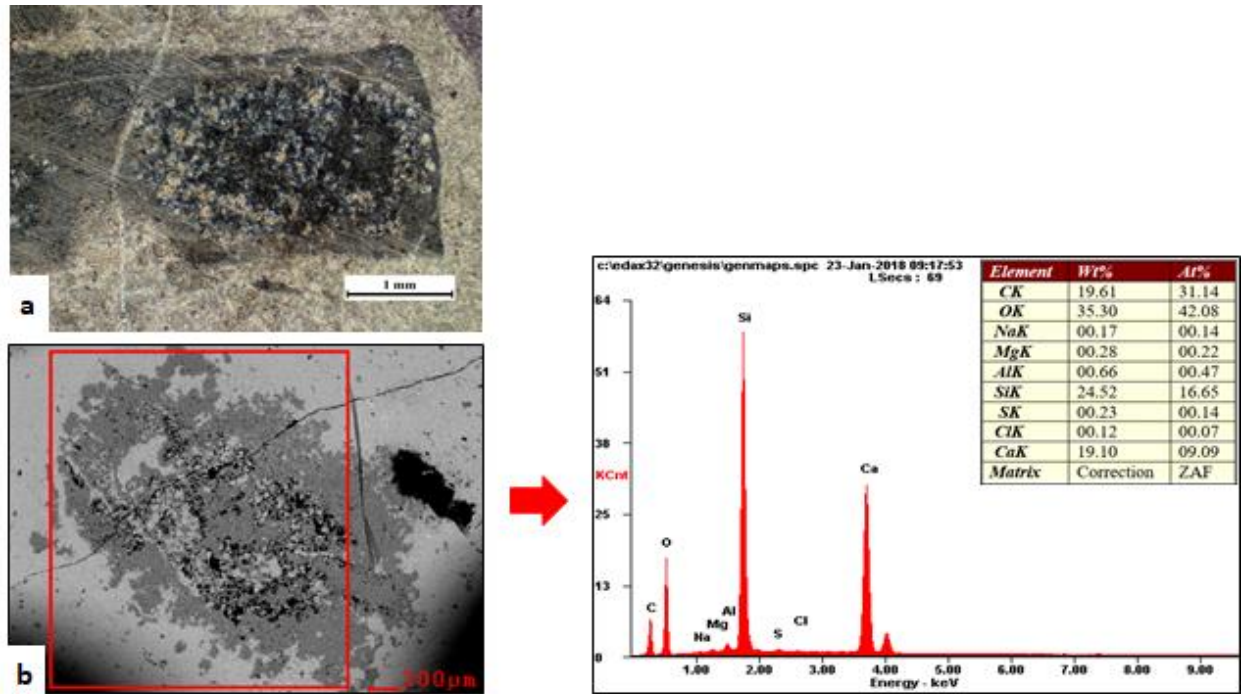


Figura 56. Fotografía de la sección CC5-M1. (a) Zona 2 vista desde el Microscopio triocular de luz transmitida marca LEICA, modelo DM750P del laboratorio de GIGBA, en nicóles cruzados. (b) Área representativa del cristal a analizar con su respectivo resultado.

En la zona 2 de la sección delgada se escogió un área con múltiples contrastes de color, (Ver Figura 56) primero se realiza un análisis tomando un área representativa de la zona en la cual arroja como resultando un alto contenido de Si y Ca, cabe resaltar que la alta presencia de Si es poco común en una caliza de alta pureza por lo tanto es probable que se trate de reemplazamiento por silicatos dentro de la estructura de un bioclasto.

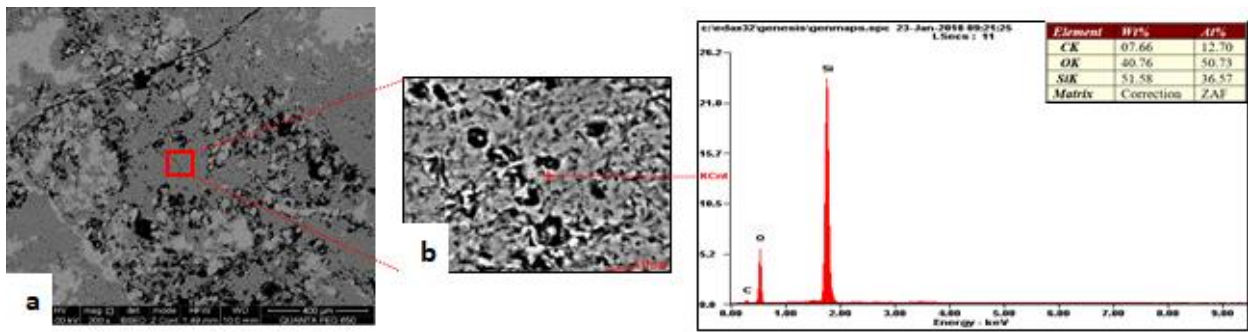


Figura 57. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados del análisis puntual realizado para el área seleccionada de la zona 2 con mayor aumento.

Posteriormente se redujo el área como se observa en la Figura 57a para realizar un análisis puntual el cual se ve reflejado en la Figura 57b, este arroja como resultado un alto contenido de Si y nada de Ca lo cual soporta la hipótesis anterior sobre este cristal.

- CC5-M1-Z3

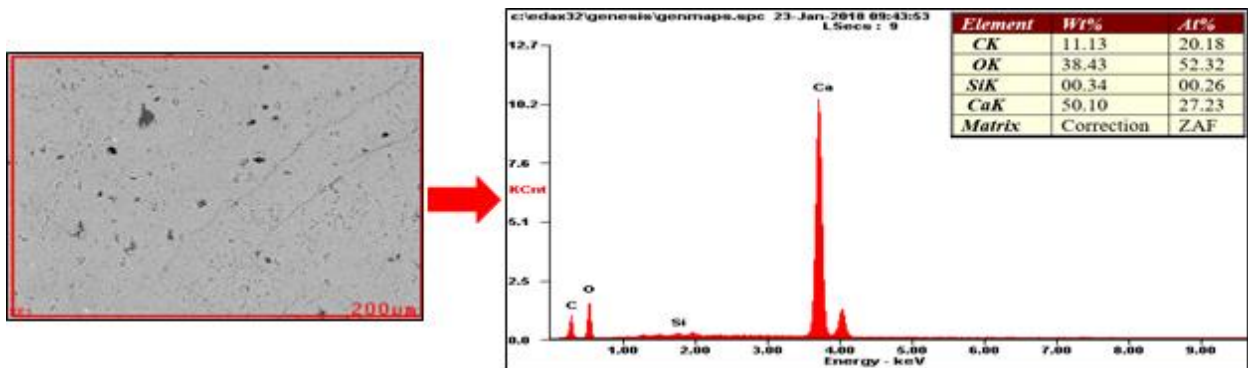


Figura 58. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados del análisis realizado para el área seleccionada de la zona 3.

Se realizó un análisis composicional de toda el área que abarca la zona 3, el resultado nos muestra un alto contenido de Ca y en menor proporción Si, este tipo de composición es la que más predomina en la muestra sin embargo en la imagen se ve una variación en ciertos sectores en la

tonalidad de color lo cual puede indicar una distinta composición en esos sectores, esto nos indicaría la presencia de Calcita principalmente.

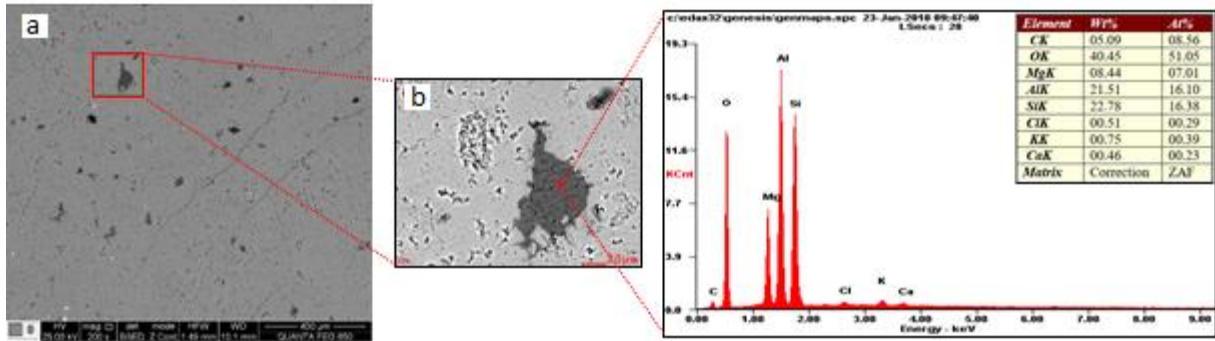


Figura 59. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados de los análisis puntuales realizados para el área seleccionada de la zona 3 con mayor aumento.

Para confirmar la variedad composicional en las tonalidades más oscuras en la zona seleccionada se realizó un análisis puntual a un sector de la Figura 59b. Donde se confirma por medio del resultado que presenta un bajo contenido de Ca y un alto contenido de otros elementos como el Al, Si y Mg. En base a su composición y forma podría tratarse de un intraclasto ya dolomitizado.

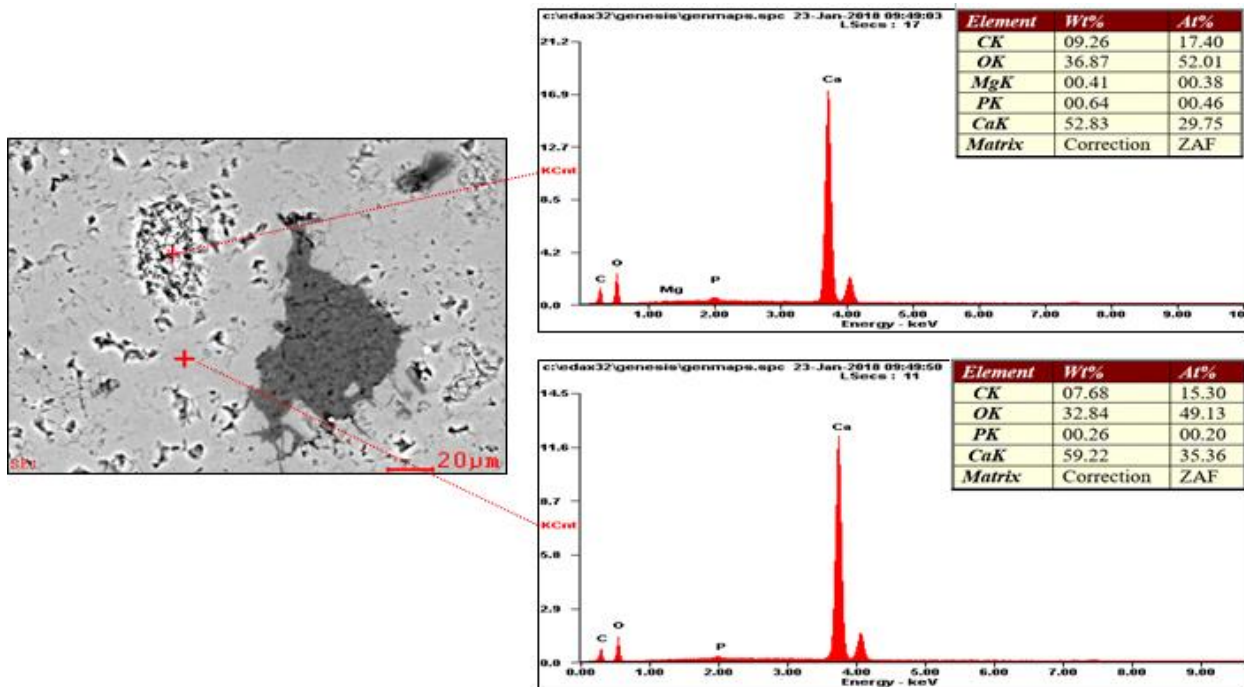


Figura 60. Microfotografía de la sección delgada CC5-M1. Imágenes y resultados de los análisis puntuales realizados para la zona 3 con mayor aumento.

Se realizaron más análisis puntuales en el área seleccionada (Ver Figura 60) con el fin de ver la composición de las distintas tonalidades presentes en la imagen, en este caso los dos puntos seleccionados dan una composición casi igual, en ambas se resalta el alto contenido de Ca. Esto evidencia que, aunque existen variaciones locales de composición, los elementos más abundantes favorecieron la precipitación de Calcita.

8.3.3 Sección delgada CC12-M1 (Fm. Bocas).

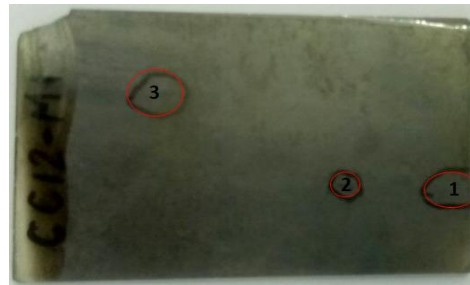


Figura 61. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC12-M1.

- CC12-M1-Z1

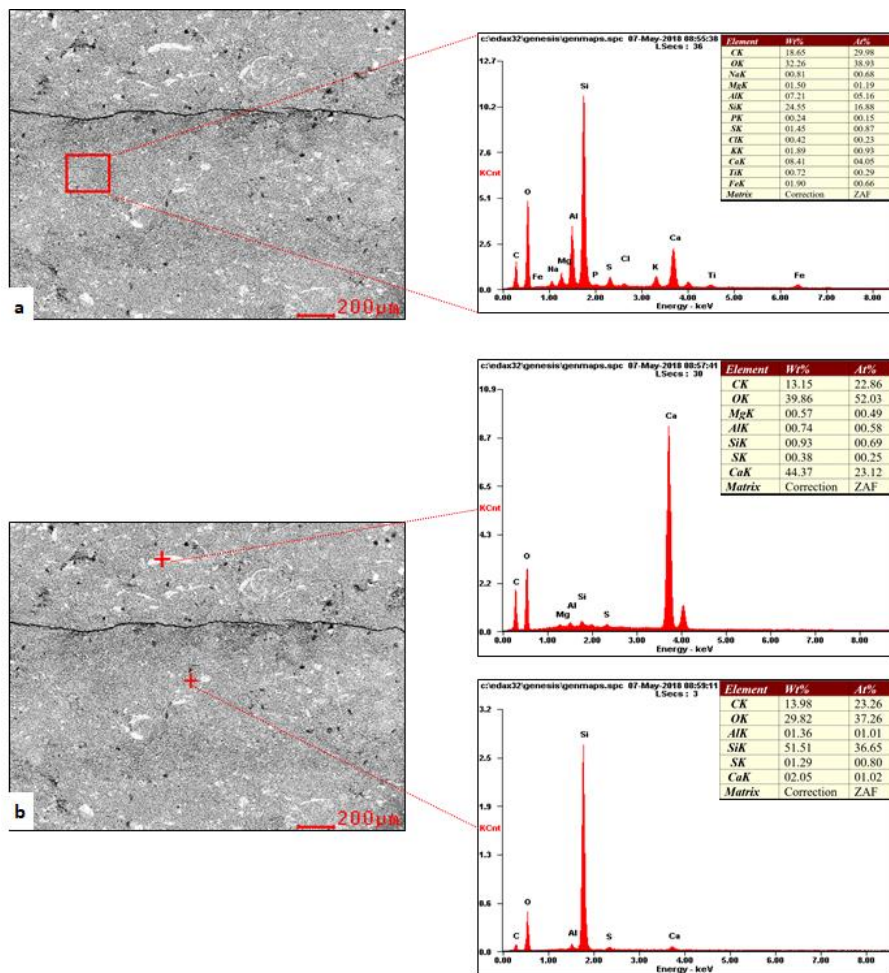


Figura 62. Microfotografía de la sección delgada CC12-M1. (a) Área representativa de la zona 1 con su respectivo resultado. (b) Puntos seleccionados dentro de la zona 1 con sus respectivos resultados.

En la Figura 62a y b se observan principalmente dos tonalidades, una grisácea y otra que es mucho más blanca, en la Figura 62a se selecciona un área representativa de la matriz que tiene una tonalidad más gris como resultado se observa composicionalmente una mayor proporción de sílice vs calcio esto nos indicaría que hay un aporte terrígeno mayor en la composición mineralógica de la roca, además de que hay presencia de otros elementos como el Fe, Na, Mg, Al, etc.

En la Figura 62b se seleccionan dos puntos para realizar un análisis, el punto superior que tiene una tonalidad blanca nos arroja como resultado un alto contenido de Ca lo que nos confirmaría teniendo en cuenta la forma y estructura que muestran estas tonalidades en la imagen que son bioclastos y el punto inferior de la imagen que selecciona la matriz nos arroja un alto contenido de Si que pertenecería a un cristal de Cuarzo.

- **CC12-M1-Z2**

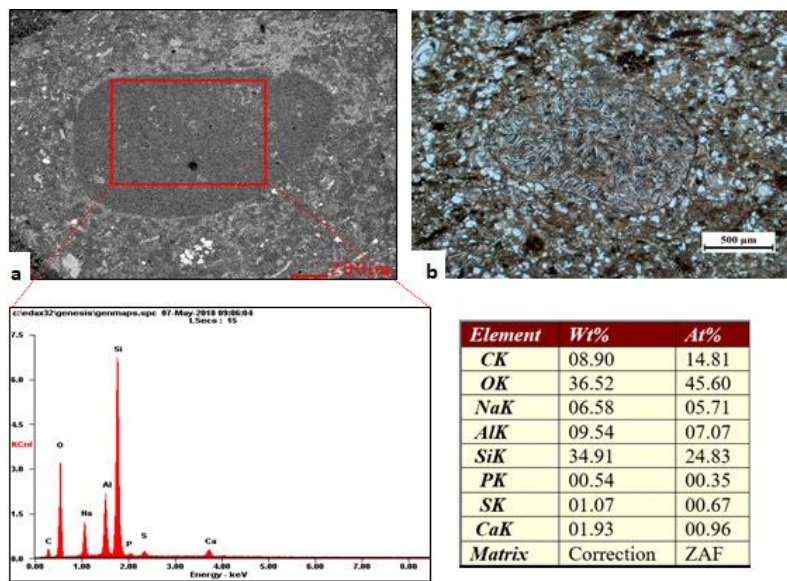


Figura 63. Microfotografías de la sección delgada CC12-M1. (a) Extraclasto encontrado en la sección delgada CC12-M1, visto desde el Microscopio Qanta FEG 650 del laboratorio de microscopia, área representativa seleccionada con sus respectivos resultados. (b) Extraclasto visto desde el Microscopio

trioocular de luz transmitida marca LEICA, modelo DM750P del laboratorio de GIGBA, en nicoles cruzados.

Se realizó un análisis puntual escogiendo el área representativa del extraclasto mostrado en la Figura 63a esto con el fin de entender su origen de procedencia, se observa que tiene una forma bastante elipsoidal y una alta redondez debido a sus bordes, los resultados arrojaron un alto contenido de Si, Al y Na principalmente lo que confirma que es un fragmento de roca el cual fue formado en condiciones distintas.

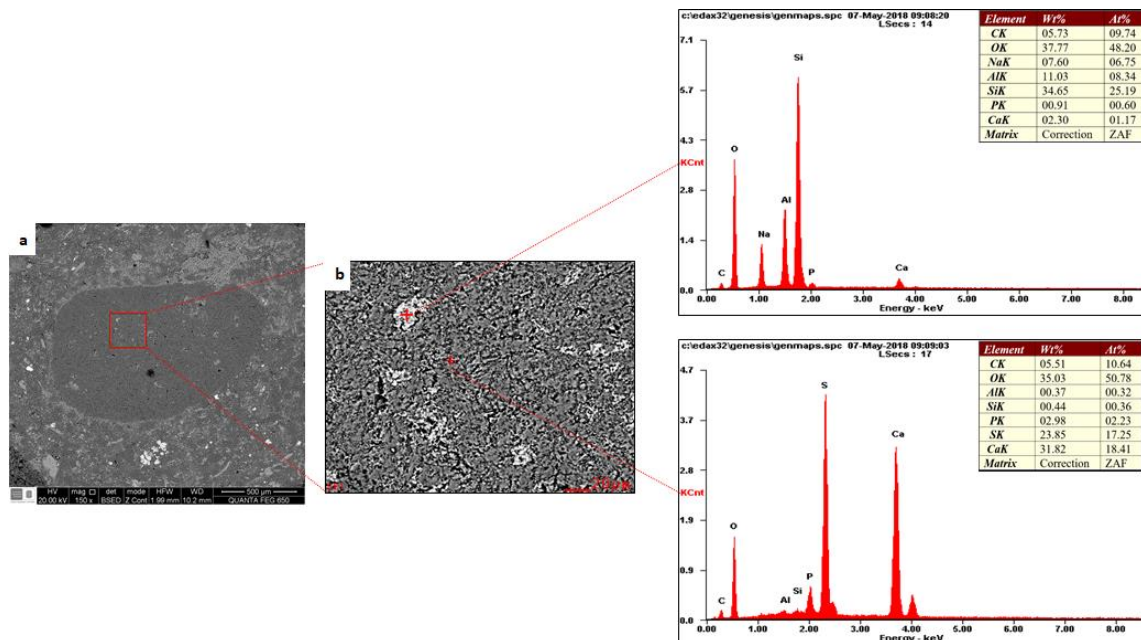


Figura 64. Microfotografía de la sección delgada C12-M1. (a) Imagen a menor aumento de la zona 2 la cual está enfocada principalmente en el extraclasto encontrado. (b) Puntos seleccionados para el análisis dentro del área seleccionada en la imagen (a) con sus respectivos resultados.

Se realizó un análisis con más detalle de la composición de este extraclasto, se seleccionó el área representativa en la Figura 64a y posteriormente se escogieron los puntos mostrados en la Figura 64b, el punto superior arroja una alta presencia de Si, siendo el principal elemento de composición de este extraclasto y el punto inferior arroja un alto contenido de Ca y S.

- CC12-M1-Z3

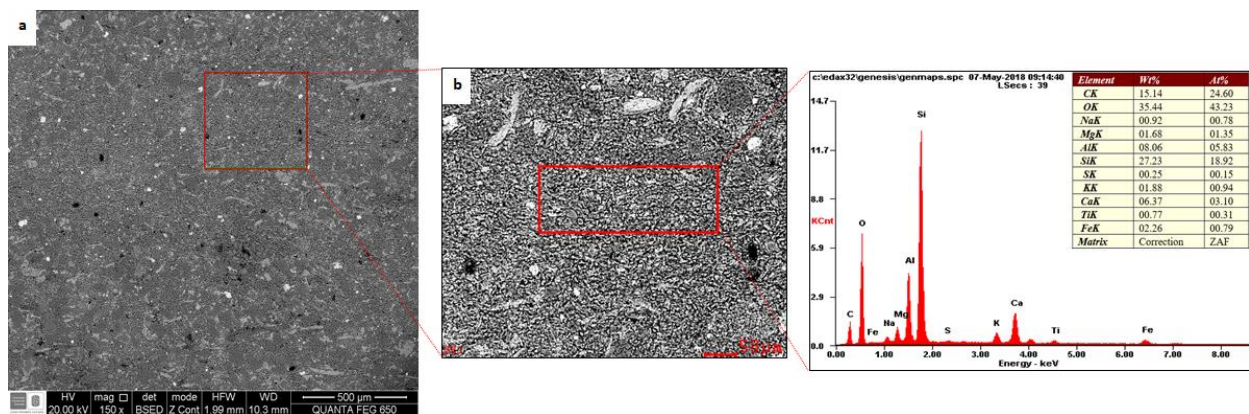


Figura 65. Microfotografía de la sección delgada CC12-M1. (a) Área representativa de la zona 3. (b) Área analizada, parte representativa de la matriz de la roca con sus respectivos resultados.

La Figura 65a nos muestra dos tonalidades principalmente, las más claras, casi blancas, son bioclastos y las más oscuras hacen parte de la matriz que tienen un aporte terrígeno principalmente. Se analizó el área mostrada en la Figura 65b, donde se observa un mayor porcentaje de Si vs Ca, esto se debe a que esta área abarca principalmente la matriz de la roca, esto correlacionado con la petrografía nos indicaría una mayor presencia de Cuarzo en la matriz de la roca que de Micrita en este sector de la muestra.

8.3.4 Sección delgada CC12-M2 (Fm. Bocas).

- CC12-M2-Z1

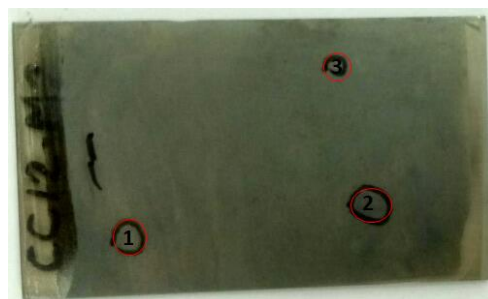


Figura 66. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC12-M1.

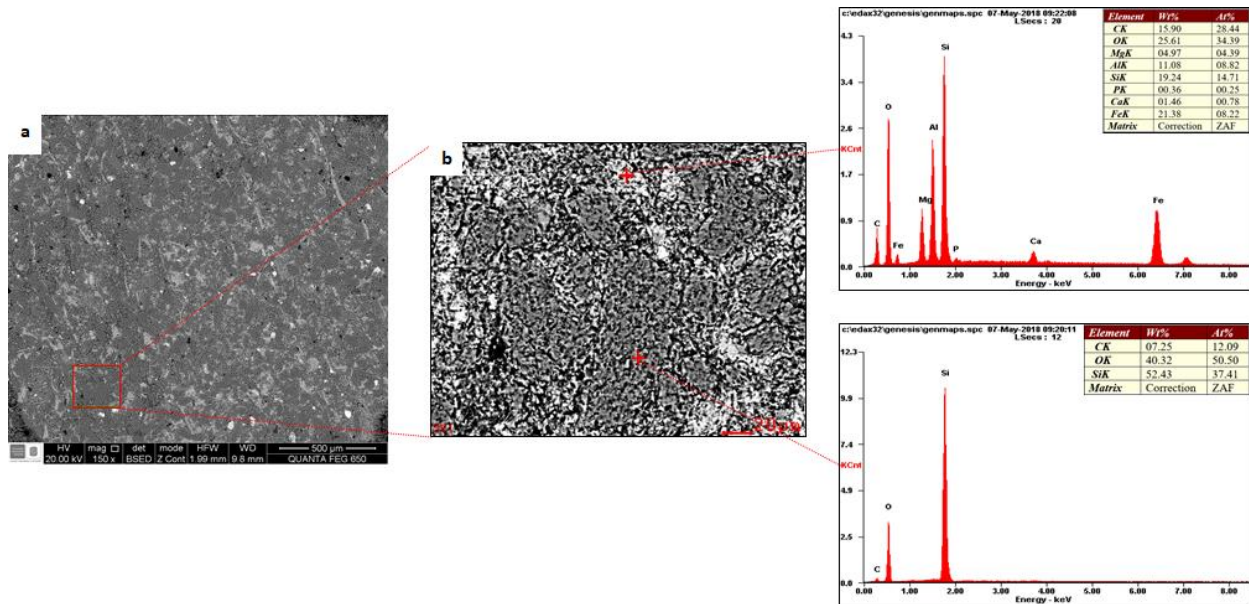


Figura 67. Microfotografía de la sección delgada CC12-M2. (a) Área representativa de la zona 2. (b) Puntos analizados del área representativa con sus respectivos resultados.

Se analizaron dos puntos, mostrados en la Figura 67b dentro del área representativa mostrada en la Figura 67a. El punto superior con una tonalidad clara arroja un alto contenido de Si, Fe y Al, lo que indica que es un fragmento de roca probablemente y el punto inferior izquierdo con una tonalidad oscura y con un alto contenido de Si, pertenece a un cristal de Cuarzo.

- CC12-M2-Z2

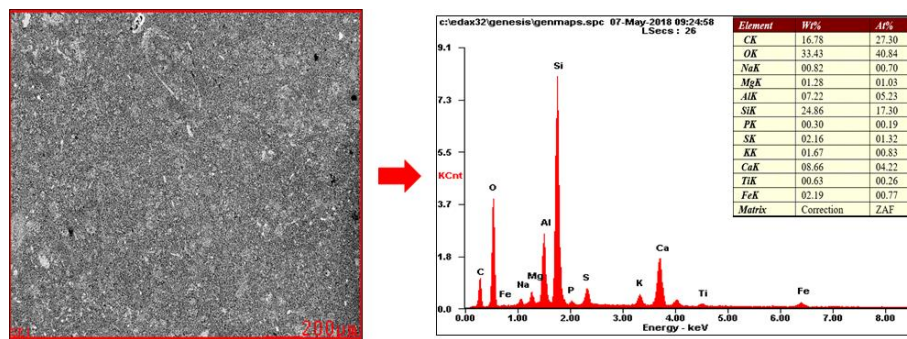


Figura 68. Microfotografía de la sección CC12-M2. Área representativa de la zona 2 con sus respectivos resultados.

Se analizó el área mostrada en la Figura 68 con el fin tener una idea del aporte terrígeno vs los carbonatos presentes en la muestra, queda en evidencia que el aporte de Si es mayor al del Ca, en la imagen se logran distinguir varios bioclastos que son las tonalidades más claras.

- CC12-M2-Z3

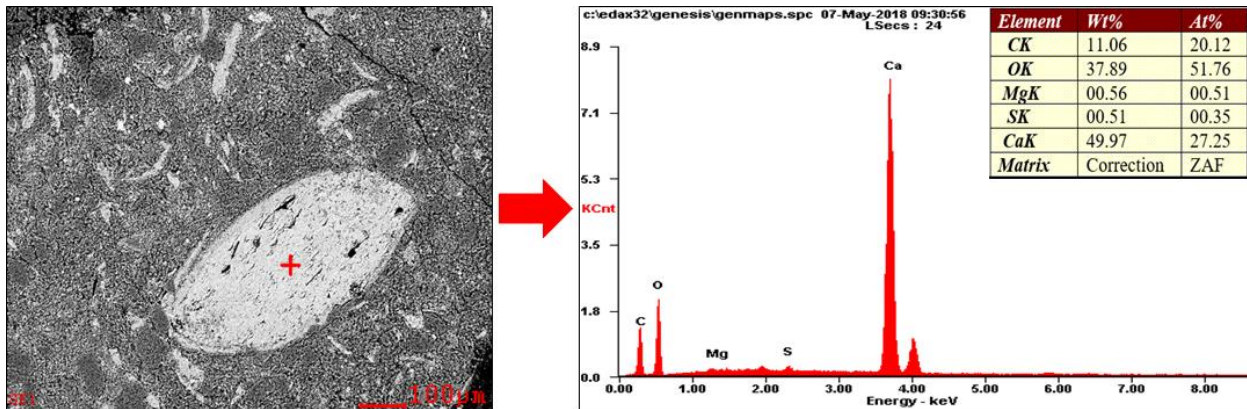


Figura 69. Microfotografía de la sección CC12-M2. Bioclasto ubicado en la zona 3 con sus respectivos resultados por medio de un análisis puntual.

Se realizó un análisis puntual a este bioclasto (Ver Figura 69) con el fin de confirmar la composición de esta tonalidad clara presente en la muestra, arrojó un alto contenido de Ca lo que confirma que estas tonalidades en la muestra CC12-M1 y CC12-M2 pertenecen a bioclastos o microfósiles preservados.

8.3.5 Sección delgada CC30-M1 (Dique Andesítico)

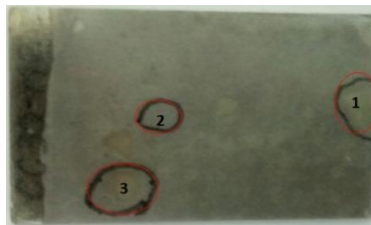


Figura 70. Fotografía de las zonas analizadas por medio del SEM para la sección delgada CC12-M1.

- CC30-M1-Z1

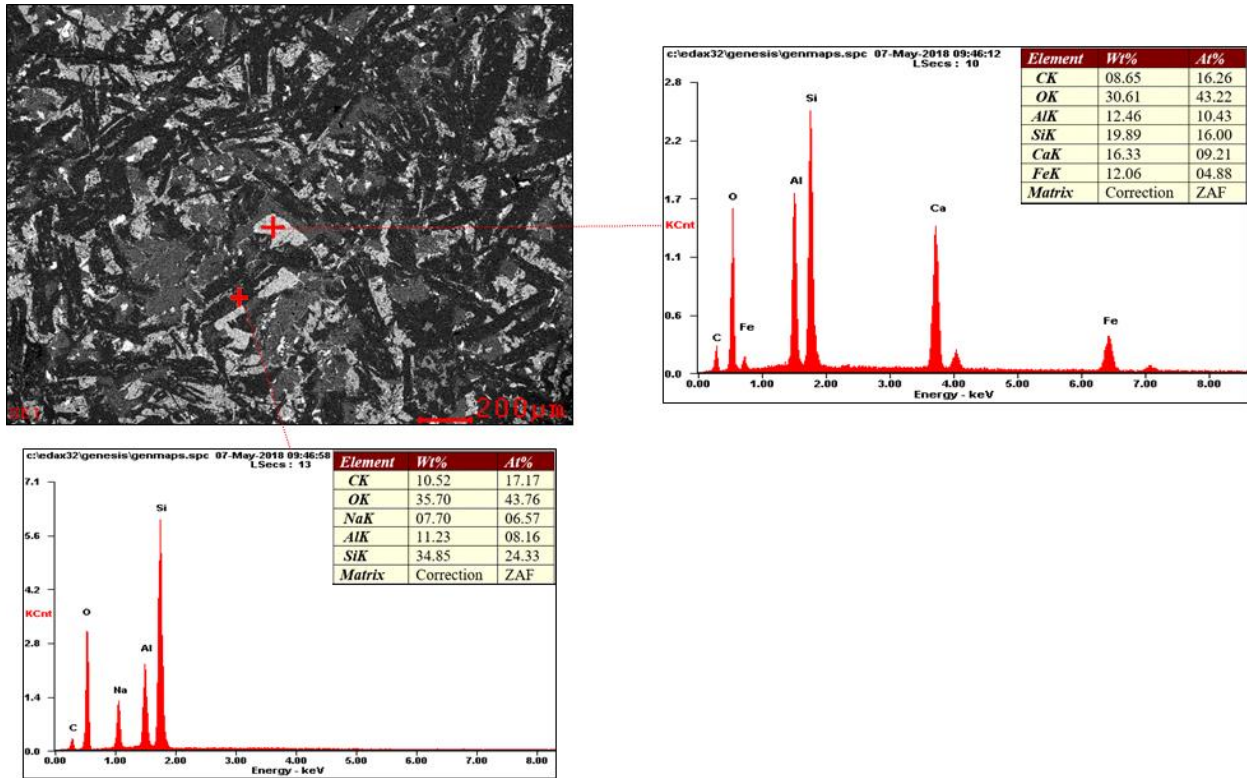


Figura 71. Microfotografía de la sección CC30-M1. Puntos de análisis seleccionados con sus respectivos resultados en la zona 1.

En la Figura 71 se presentan tres tonalidades principalmente, la más clara que pertenece a un cristal de epidota, tiene una textura bastante rugosa y un hábito irregular, la tonalidad grisácea pertenece a un cristal de Calcita debido a su alto contenido de Ca.

- CC30-M1-Z2

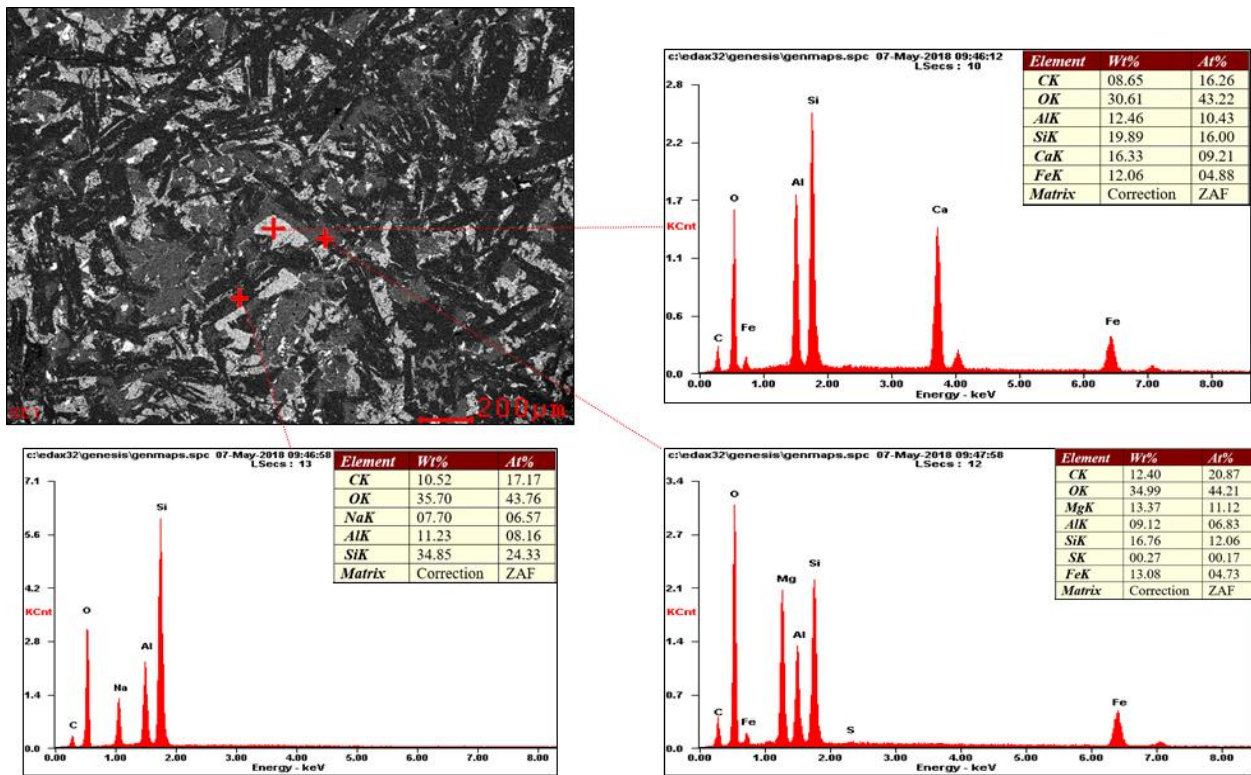


Figura 72. Microfotografía con análisis puntuales con sus resultados sobre cristales que pertenecen a la matriz de la sección delgada CC30-M1.

En la Figura 72 se observa un área representativa de la matriz de la muestra CC30-M1, se realizaron tres análisis puntuales, el primero sobre un cristal de tonalidad bastante clara y un hábito irregular, dio como resultado un alto contenido de Si, Ca y Al lo que concuerda más a un cristal de Plagioclasa, el segundo sobre un cristal de una tonalidad más grisácea y con un hábito prismático, el cual arrojó como resultado un alto contenido de Mg, Al, Si y Fe lo que concuerda con el cristal de una Augita.

- CC30-M1-Z3

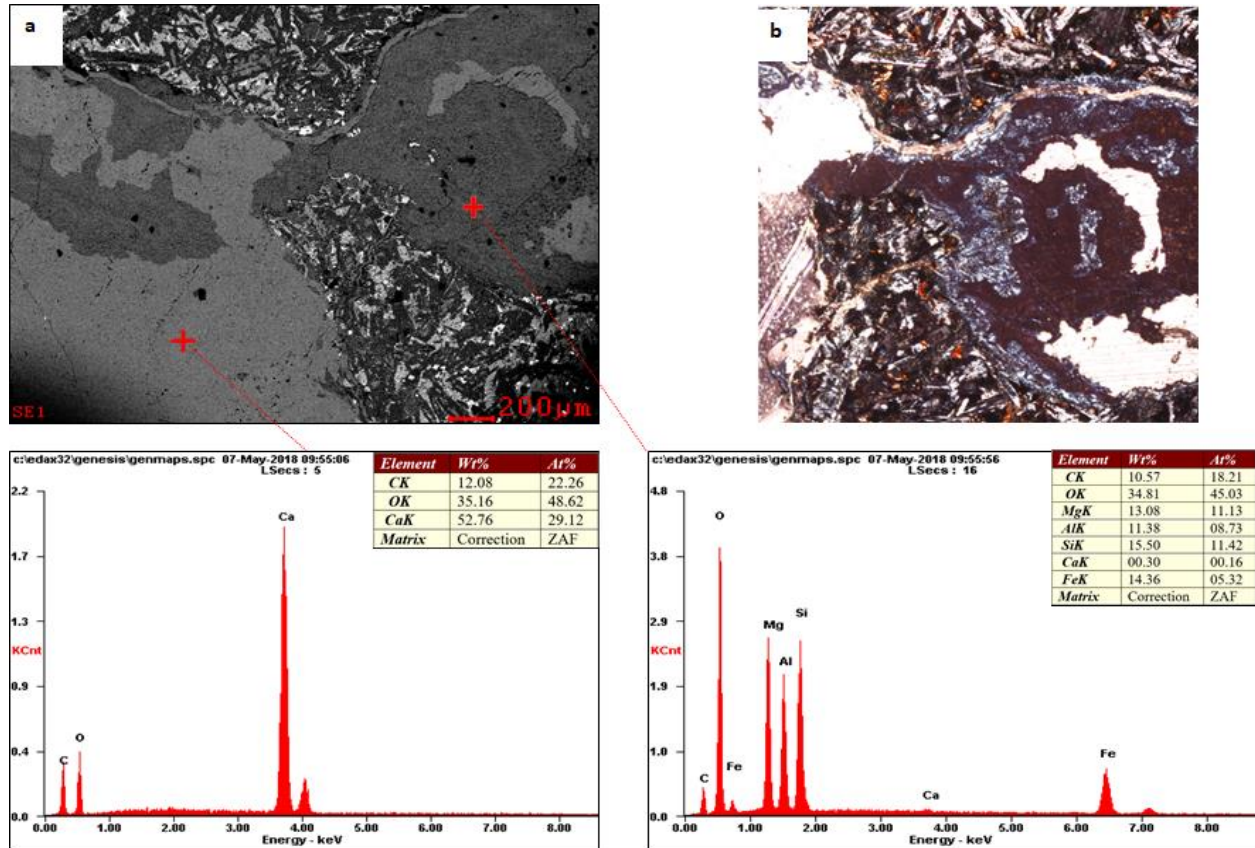


Figura 73 . Microfotografía de la extura amigdalara en la sección CC30-M1. (a) Puntos de análisis para la zona 3 con sus respectivos resultados. (b) Zona analizada vista desde el Microscopio triocular de luz transmitida marca LEICA, modelo DM750P del laboratorio de GIGBA, en nicoles cruzados.

En la Figura 73a se realizan dos análisis puntuales en la zona 3, la primera para una tonalidad gris clara la cual arroja principalmente Ca, lo que sería una Calcita que está presente relleno de las vesículas de la muestra según la petrografía, y otra tonalidad analizada es una más gris oscura la cual da con contenido de Mg, Al, Si y Fe lo que sería la Clorita que también está presente en las vesículas según la petrografía realizada.

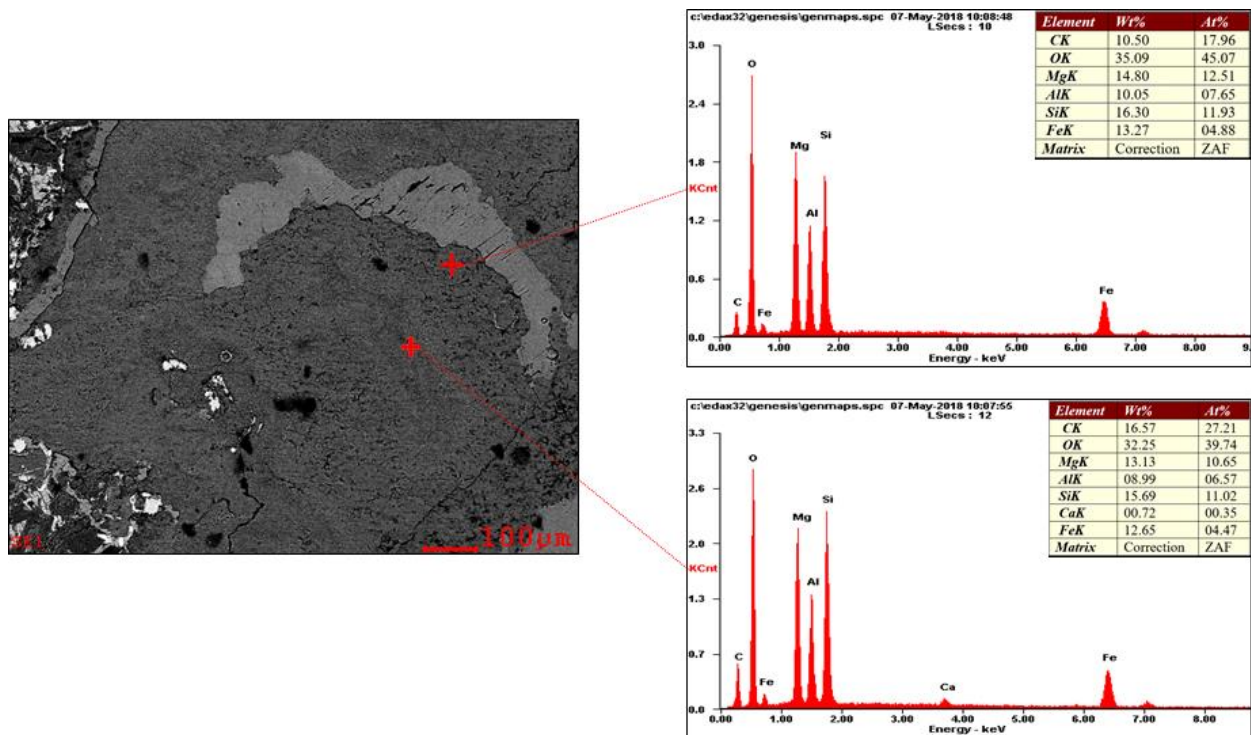


Figura 74. Microfotografía de la sección CC30-M1. Puntos de análisis con sus respectivos resultados para la zona 3.

Se realizaron dos puntos más por el mismo sector esta vez en dos tonalidades muy parecidas, composicionalmente solo se diferencian en que el punto inferior presenta un pico de Ca mientras que el superior no, esto mostraría la diferencia entre la Zeolita que sería el punto inferior y la Clorita presentes en la muestra como relleno de las vesículas. (Ver Figura 74)

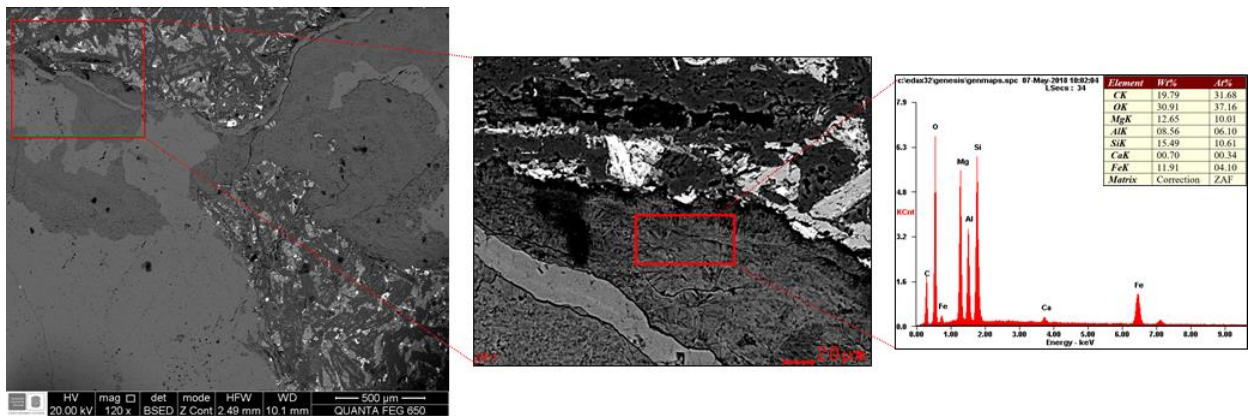


Figura 75. Microfotografía del área con mayor aumento de la zona 3, análisis de una zona representativa con su respectivo resultado.

Se realizó un análisis más detallado con el fin de mirar composicionalmente la textura radial con una tonalidad gris clara en la imagen y arroja como resultado la presencia de Mg, Al, Si, Ca y Fe lo que confirmaría la presencia de Zeolita en la muestra. (Ver Figura 75)

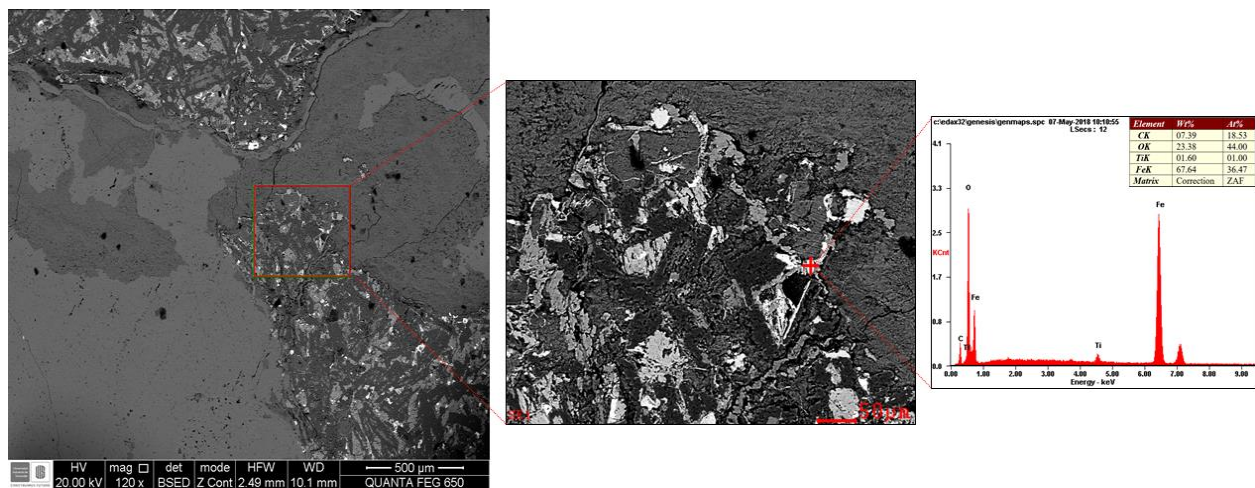


Figura 76. Microfotografía de la zona aumentada que abarca la matriz de la roca, análisis puntual de un cristal con su respectivo resultado.

Se realiza un análisis puntual en la matriz de la roca con el fin de mirar composicionalmente los puntos blancos presentes, esto arroja como resultado un alto contenido de Fe, lo que confirma la presencia de Hematita en la roca y algunos óxidos de hierro. (Ver Figura 76)

8.4 Análisis Mediante Difracción de Rayos-X (DRX)

Los registros de difracción mostrados en este capítulo muestran en el eje de las ordenadas la intensidad (Counts) y en el eje de las abscisas el ángulo 2θ . Fuera de la base de datos contenida en el software *DIFFRAC.EVA. V 4.1*, se utilizaron otros valores de comparación de algunos minerales reportados en trabajos como Triviño (1994), ICDD (1997), Rojas (2008), Ramírez (2016) y Pimentel (2017).

Tabla 3.

Mostrando valores d para los tres picos de mayor importancia y magnitud de 4 minerales de comunes en rocas calizas. Modificado de ICDD (1997)

Mineral	d		
Calcita	3.04	1.88	4.02
Dolomita	2.89	2.19	1.79
Magnesita	2.74	2.10	1.70
Cuarzo	3.34	4.26	1.82

- **Muestra CC1-M1(Fm. Diamante)**

En la Tabla 9 se muestran los picos identificados para esta muestra. La relación o coherencia entre los picos del registro y los picos del patrón estándar es excelente, por tanto no quedaron picos libres, es decir, cada pico del registro tiene asignado un pico del registro estándar. La única fase mineral identificada en esta muestra fue Calcita (CaCO_3). (Ver Figura 79)

Tabla 4.

Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC1-M1.

Mineral	Ángulo 2θ	d	Intensidad (Cnt)
Calcita	23,080	3,85046	3274
	29,430	3,03256	48753
	31,461	2,84123	1373
	35,992	2,49331	35,49
	39,449	2,28240	5194
	43,189	2,09301	4672

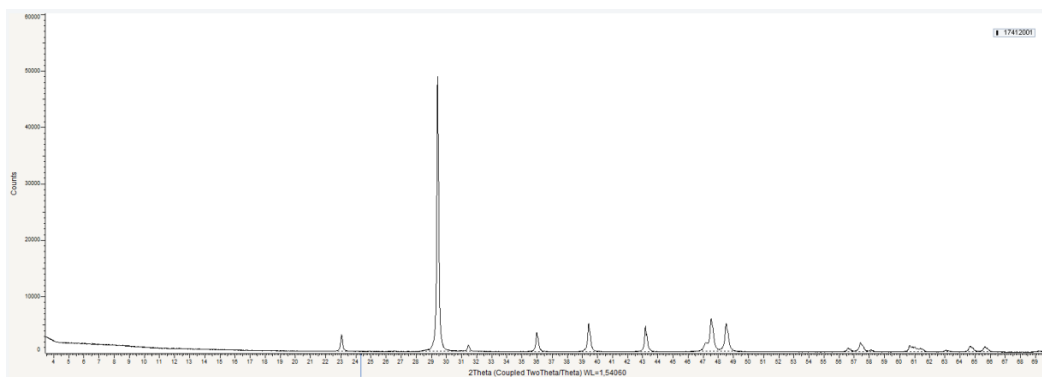


Figura 77. Difractograma obtenido para la muestra CC1-M1.

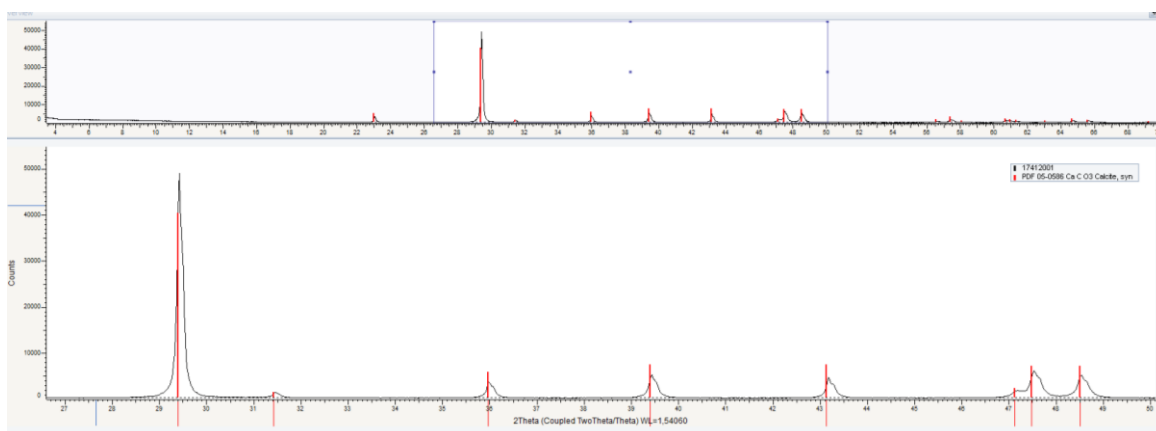


Figura 78. Zoom de la parte central del difractograma de la muestra CC1-M1. Se muestra la buena correlación entre el registro y el patrón estándar de la Calcita (PDF 05-0586) representado con líneas rojas verticales .

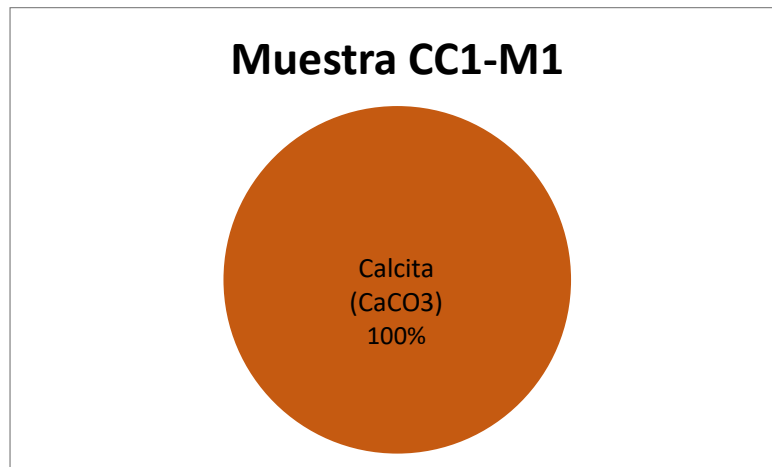


Figura 79. Diagrama mostrando los resultados semi-cuantitativos de composición de la Muestra CC1-M1. Única fase mineral determinada con esta herramienta, Calcita (CaCO₃).

- **Muestra CC7-M1 (Fm. Diamante)**

Para esta muestra se identificaron 3 fases minerales: Calcita (CaCO₃), Dolomita Ca Mg (CO₃)₂ y Cuarzo (SiO₂); donde las magnitudes de sus picos fueron mayores, intermedias y menores respectivamente. No quedaron picos libres y el empalme entre el difractograma y los registros de comparación es muy bueno. (Ver Figura 81)

Tabla 5.

Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC7-M1.

Mineral	Ángulo 2θ	d	Intensidad (Cnt)
Calcita	23,060	3,85386	3393
Calcita	29,409	3,03466	54501
Calcita	31,444	2,84276	1460
Calcita	35,965	2,40509	3809
Dolomita	30,894	2,89207	5660
Dolomita	41,069	2,19604	717
Dolomita	44,879	2,01802	466
Cuarzo	20,859	4,25529	458
Cuarzo	26,624	3,34543	818

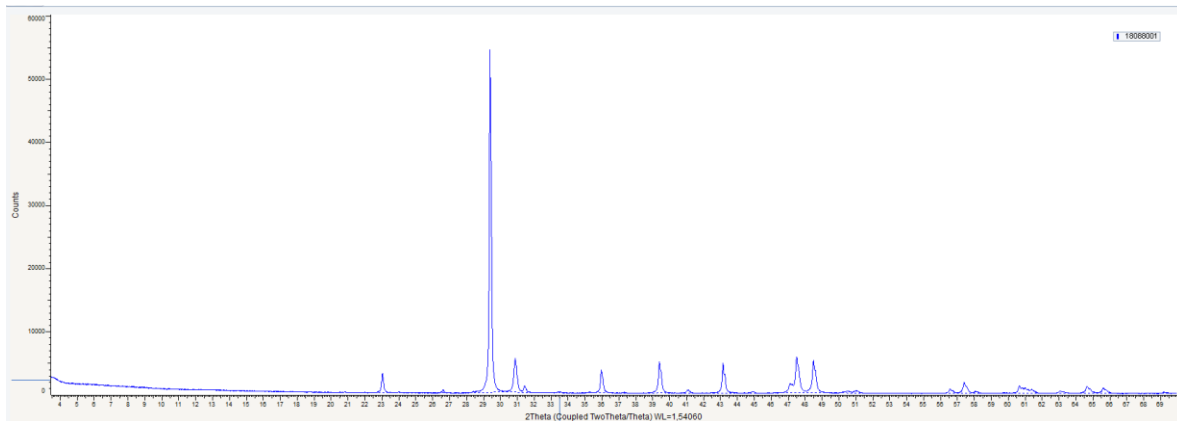


Figura 80. Difractograma obtenido para la muestra CC7-M1.

Los picos de la Calcita y Dolomita son facilmente reconocibles, mientras que el el pico del cuarzo es muy débil (poca altura), sin embargo, este se definió como parte de los componentes minerales de la roca porque su ajuste con el patrón es muy bueno, en el análisis MEB se determinó la presencia de **Si** en muestras de la misma formación y geográficamente muy cercanas, además, en otro difractograma perteneciente a esta formación hay una mejor respuesta de este mineral. Los patrones utilizados para Calcita, Dolomita y Cuarzo fueron (PDF 05-0586); (PDF 36-0426) y (PDF 46-1045) respectivamente.

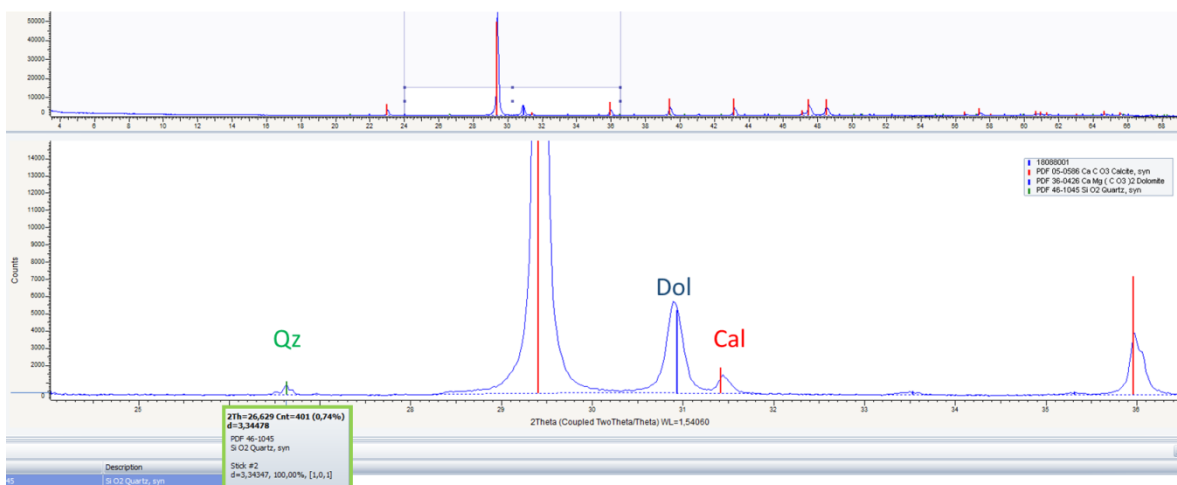


Figura 81. Difractograma de la muestra CC7-M1 mostrando zoom entre 24 - 36,5 (valores de 2θ). Se aprecian los picos correspondientes a las tres fases minerales identificadas para esta muestra): Qz (cuarzo); Dol (Dolomita); Cal (Calcita). En el recuadro de bordeado de verde se muestran las características del pico del Cuarzo.

Mediante el análisis semi-cuantitativo se determinaron los siguientes porcentajes de composición (Ver Figura 82):

- Calcita (CaCO_3) 83,8%
- Dolomita Ca Mg (CO_3)₂ 15,7%
- Cuarzo (SiO_2) 0,5%

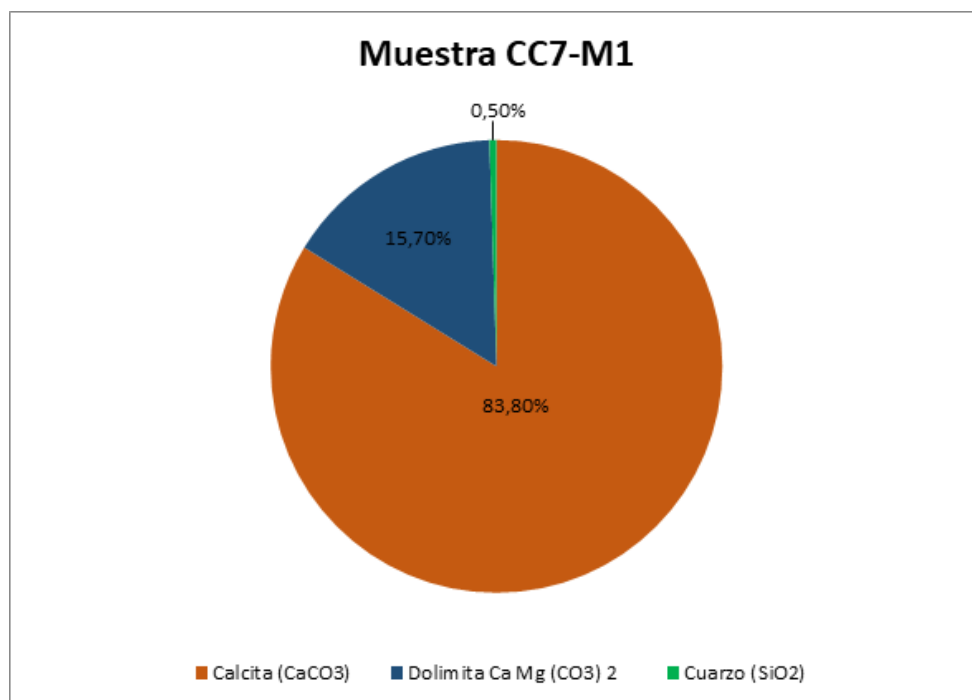


Figura 82. Diagrama mostrando resultados semi-cuantitativos de composición de la muestra CC7-M1.

- **Muestra CC12-M1 (Fm. Bocas)**

En esta muestra se identificaron dos fases minerales principales: Calcita (CaCO_3) y Cuarzo (SiO_2), estas están asociadas a los patrones PDF 05-0586 (color) y PDF 03-1161 (color) respectivamente. Sin embargo, en el difractograma es evidente la presencia de otros picos en los ángulos $2\theta = 27,934$; $2\theta = 50,289$ y $2\theta = 63,142$. Estos no mostraron buen acople con ninguno de los registros de comparación de la base de datos, por lo tanto el cálculo semicuantitativo de composición se determina únicamente con Cuarzo y Calcita. (Ver Figura 85)

Tabla 6.

Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC12-M1.

Mineral	Ángulo 2θ	d	Intensidad (Cnt)
Calcita	23,096	3,84792	2574
Calcita	29,449	3,3061	34089
Calcita	31,494	2,83832	1725
Calcita	36,020	2,49144	2689
Calcita	39,466	2,28141	4559
Calcita	43,220	2,09156	3373
Cuarzo	20,868	4,25345	3815
Cuarzo	26,646	3,34276	16902
Cuarzo	35,548	2,45661	1429
Cuarzo	40,298	2,23621	786
No Identificado	27,934	3,19147	1114
No Identificado	50,289	1,81288	1101
No Identificado	63,142	1,47129	490

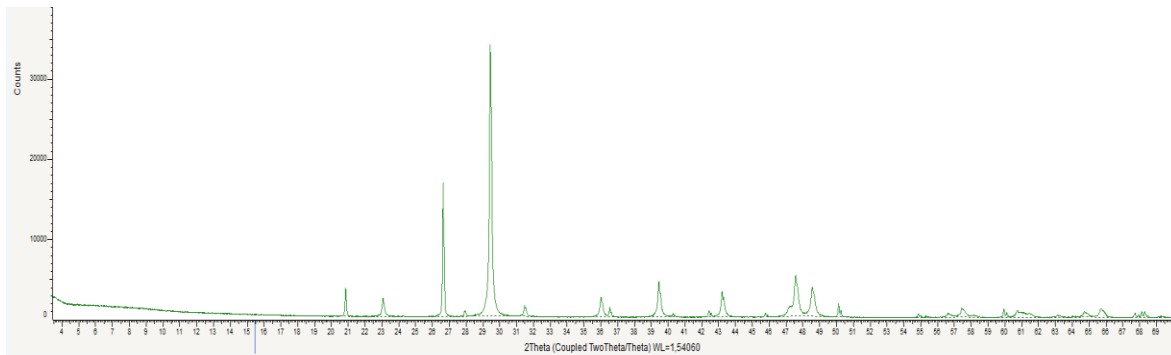


Figura 83. Difractograma obtenido para la muestra CC12-M1.

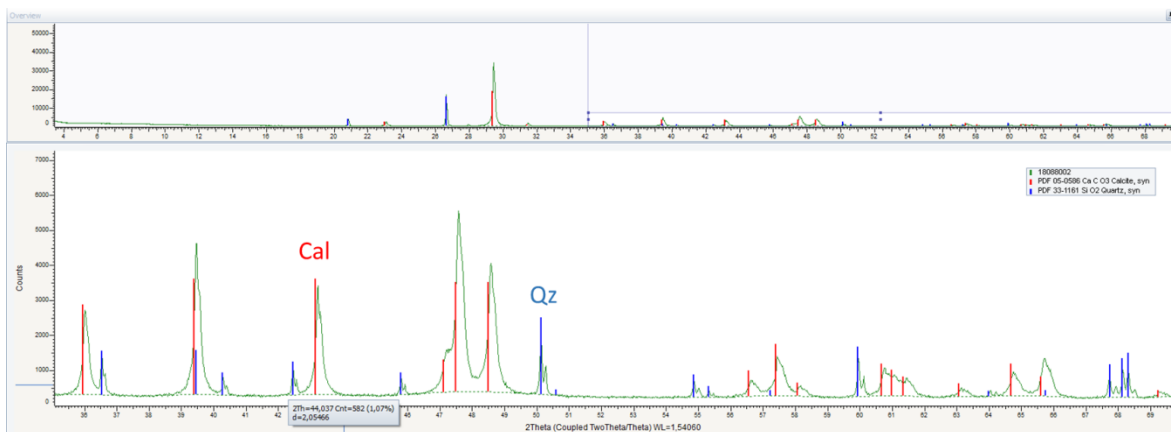


Figura 84. Zoom del difractograma de la muestra CC12-M1. Mostrando zoom entre 25 - 70 (valores de 2θ). Se aprecian los picos correspondientes a las tres fases minerales identificadas para esta muestra: Cal (Calcita) y Qz (cuarzo).

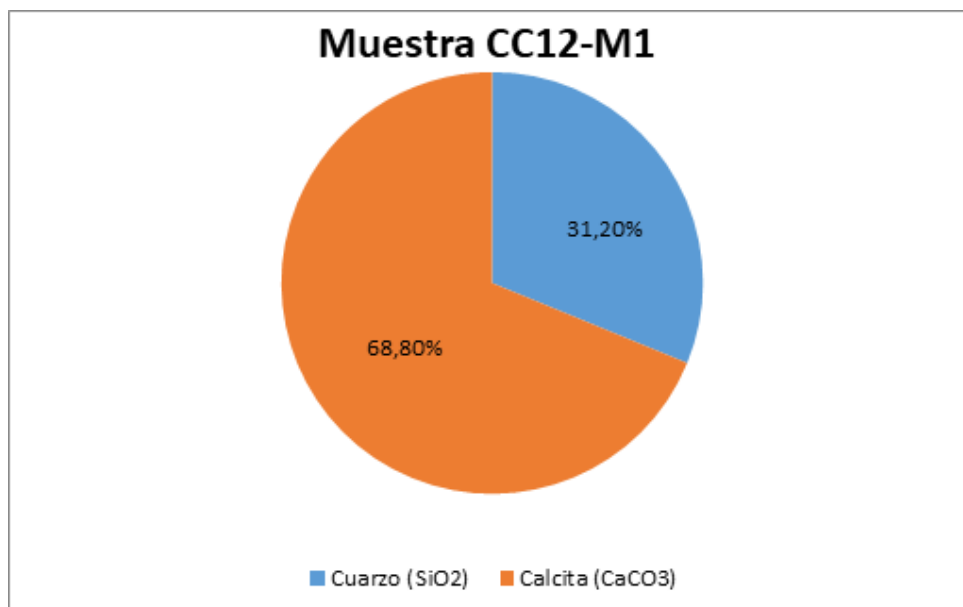


Figura 85. Diagrama mostrando resultados semi-cuantitativos de composición de la Muestra CC12-M1.

- **Muestra CC23-M1 (Fm. Diamante)**

Para esta muestra se identificaron 3 fases minerales: Calcita (CaCO_3), Cuarzo (SiO_2) y Dolomita $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$. La respuesta característica de la Calita es evidente, y se puede decir que es la más fácil de identificar. La respuesta del Cuarzo, aunque baja, es suficientemente perceptible y su acople al patrón de comparación es muy buena. (Ver Figura 87b)

Tabla 7.

Mostrando valores de 2θ y d para los picos identificados en el difractograma de la muestra CC23-M1.

Mineral	Ángulo 2θ	d	Intensidad (Cnt)
Calcita	23,058	3,85413	3193
Calcita	29,429	3,03267	45884
Calcita	31,461	2,84126	1321
Calcita	35,982	2,49394	3582
Calcita	39,444	2,28266	4951
Calcita	43,188	2,09304	4453
Cuarzo	20,841	4,25883	1785
Cuarzo	26,62	3,34591	3230
Cuarzo	36,529	2,45786	696
Dolomita	30,894	2,89209	1121

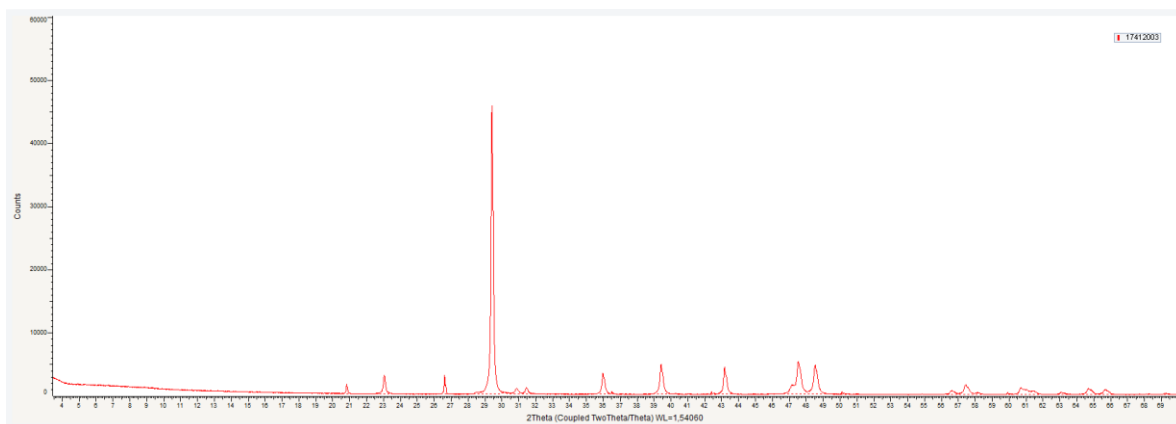


Figura 86. Difractograma obtenido para la muestra CC23-M1.

En cuanto a la respuesta de la Dolomita, se cataloga como baja, sin embargo, su acople con el patron de comparación de la base de datos es bueno en diferentes valores de 2θ lo que fue criterio para determinar su existencia en la muestra. (Ver Figura 92b)

Los patrones de comparación utilizados para esta muestra fueron: Calcita (PDF 05-0586), Dolomita (PDF 73-2324) y Cuarzo (PDF 46-1045).

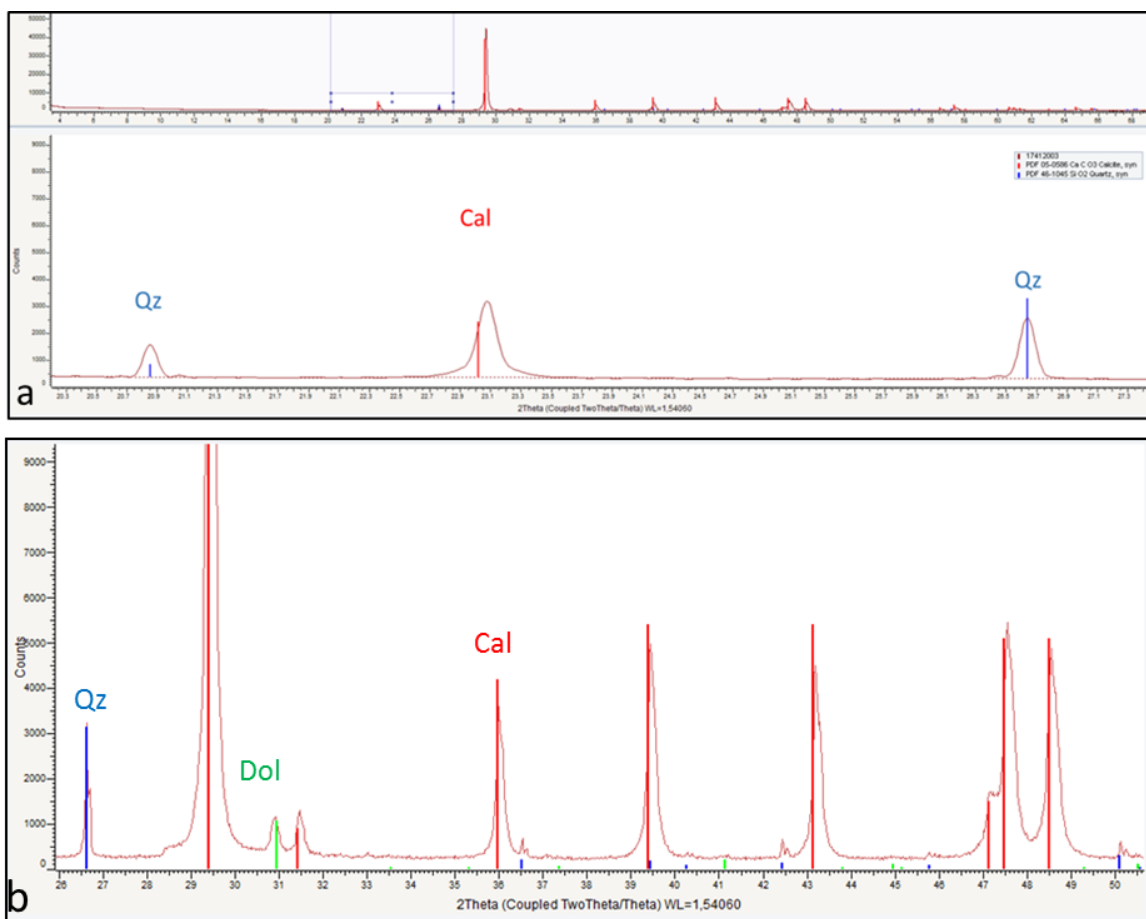


Figura 87. Difractograma de la muestra CC23-M1, con zoom. a) Mostrando zoom entre 21 - 27,5 (valores de 2θ). Se aprecian los picos del Cuarzo(azul) y Calcita (rojo).b) mostrando zoom entre 26 y 50,5 (valores de 2θ) Picos color verde corresponden a Dolomita. Pese a que la magnitud de estos picos es mínima, su correlación con el patron de comparación es buena, así que se determinó que se está presente en esta muestra.

Mediante el análisis semi-cuantitativo se determinaron los siguientes porcentajes de composición. (Ver Figura 88)

- Calcita (CaCO_3) 95,6%
- Cuarzo (SiO_2) 1%
- Dolimita Ca Mg (CO_3)₂ 3,4%

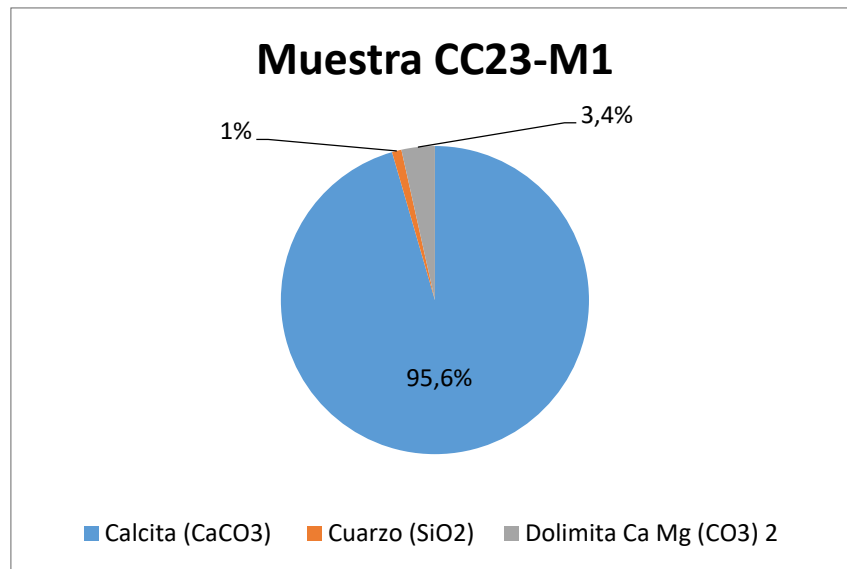


Figura 88. Diagrama mostrando resultados semi-cuantitativos de composición para la muestra CC23-M1.

Con intención de establecer una tendencia global en la composición de las muestras, se realizó una comparación de los cuatro difractogramas obtenidos y se ilustra en la Figura 89.

Como característica común principal, se encuentra que la reflexión de mayor magnitud se encuentra en $29^\circ > 2\theta < 29,5^\circ$ correspondiente al pico principal de la calcita, también la similitud en los patrones a ángulos $2\theta > 36^\circ$. La discriminación de fases minerales es mucho más fácil identificando los picos principales a ángulos $2\theta < 32^\circ$.

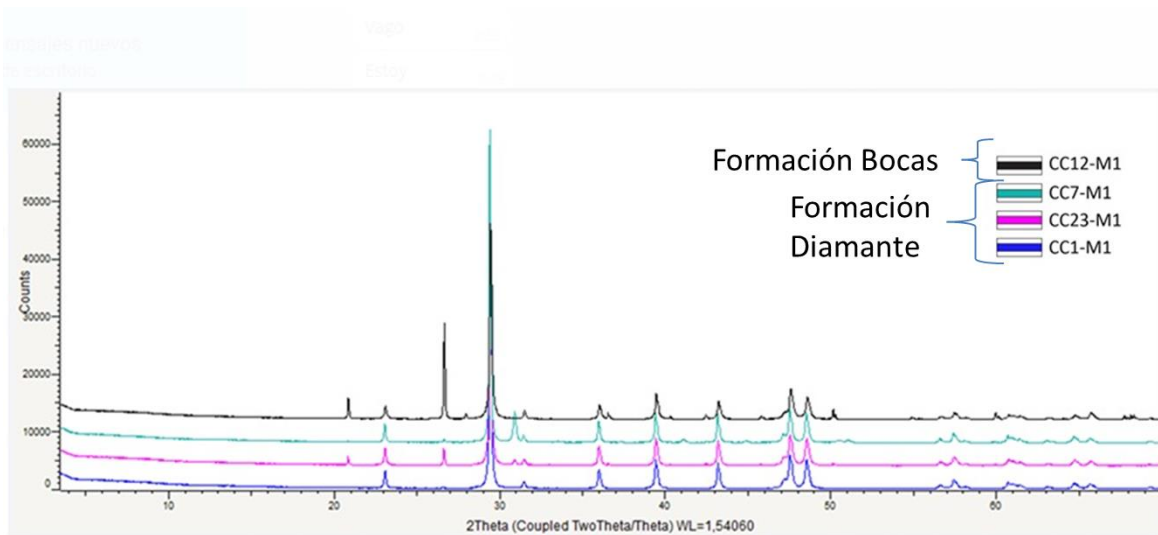


Figura 89. Difractogramas compilados para determinar la tendencia composicional general de las muestras.

8.5 Cálculo de volúmenes

Con el fin de darle cumplimiento al último objetivo planteado en el proyecto, se realizó el cálculo de volúmenes de roca. Este es un requerimiento esencial para el posterior cálculo de reservas mineras. En la Figura 90, se muestra el trazo de los perfiles en planta. Para ver el fundamento teórico del procedimiento utilizado y tener una explicación más detallada del procedimiento utilizado en estos cálculos, se sugiere remitirse al numeral 6.4 Cálculo de volúmenes y mirar el Apéndice E.

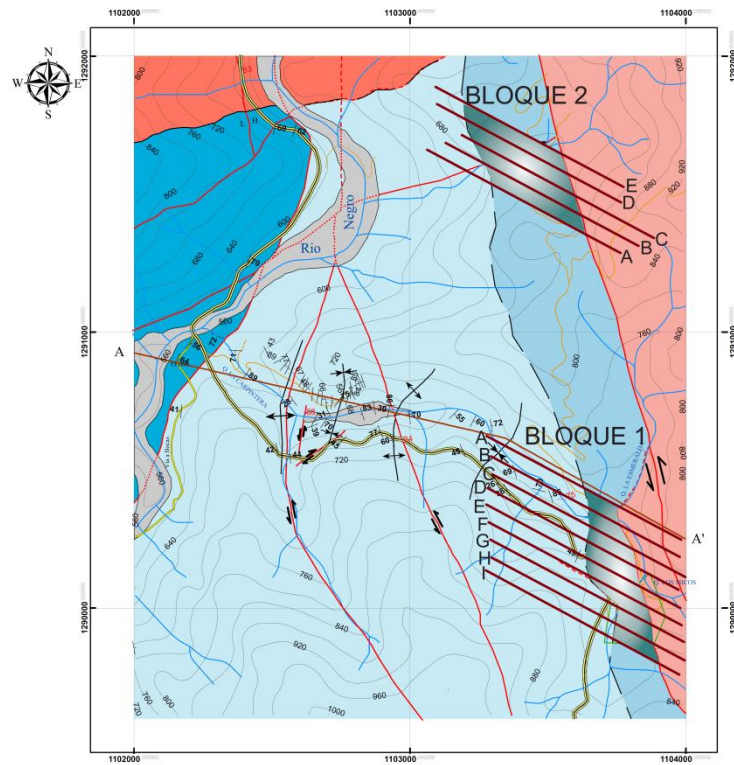


Figura 90. Mapa geológico con los trazos en planta de los cortes utilizados para el cálculo de volúmenes de roca.

Una vez finalizadas las fases de campo y laboratorio, se concluyó que la formación que mejores características de continuidad, espesor y pureza, posee para futuros proyectos de minería de caliza en la zona de estudio es la Formación Diamante (PCd).

Una vez determinada la formación de interés, fue necesario dividirla en dominios o “bloques” tomando como criterio principal la distribución espacial de los datos de estratificación.

Se definieron entonces dos bloques; el bloque 1 se encuentra ubicado en la parte SE del área de estudio y sobre el título minero AGM-151. Este cuenta con una mayor densidad de datos y sobre este se realizaron 9 cortes geológicos (1-A; 1-B; 1-C...1-I) con rumbo N60W. El bloque 2 está situado en la parte NE del área de estudio sobre este se realizaron únicamente cinco cortes geológicos (2-A; 2-B...2-E) con un rumbo de N65W. En ambos casos se utilizó un espaciamiento

de 50m entre cada corte y una profundidad estándar 50m bajo la cota más baja para cada área transversal utilizada en el cálculo de volumen.

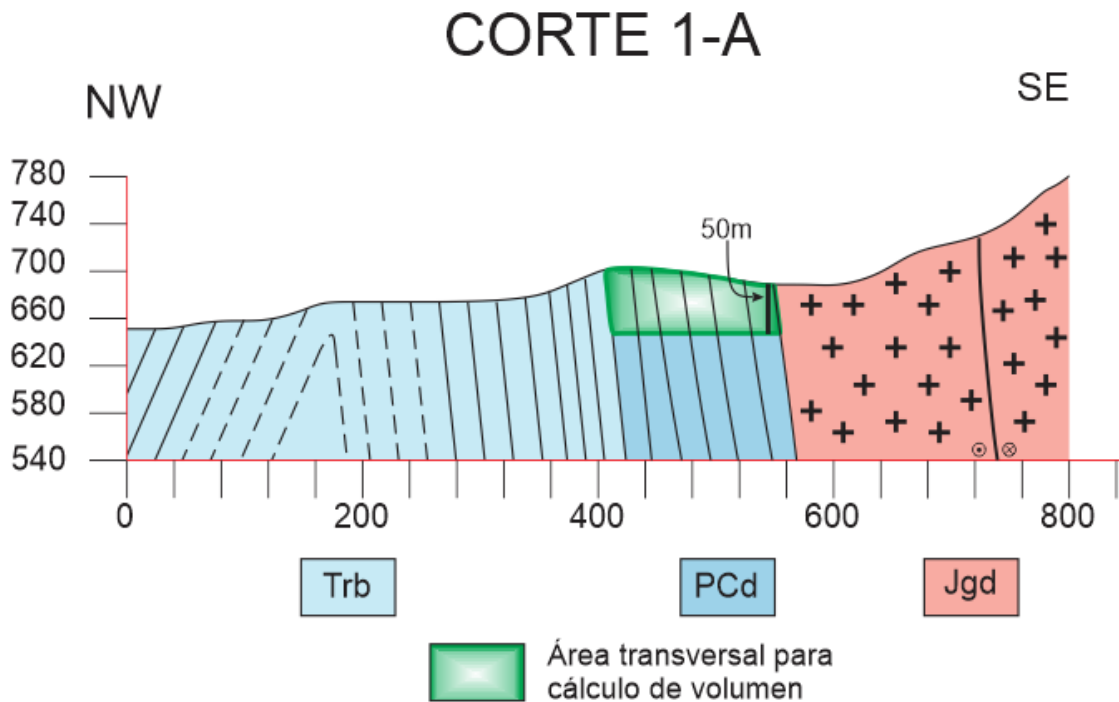


Figura 91. Ejemplo de uno de los cortes geológicos utilizados en el procedimiento de cálculo de volumen de roca. Las líneas segmentadas indican un escenario inferido a partir de los datos circundantes.

Trb: Formación Bocas; PCd: Formación Diamante; Jgd: Batolito de Rionegro. Ver Anexo 6.

Tabla 8.

Tablas de volúmenes de roca para el bloque 1 y el bloque 2.

Volumen en m ³ por intervalos en cada bloque			
Bloque 1		Bloque 2	
a-b	365875,575	a-b	2497121,138
b-c	446245,40	b-c	1650623,308
c-d	634460,855	c-d	1006505,733
d-e	902439,1225	d-e	1020393,38
e-f	1141604,84	TOTAL bloque 2	6174643,558
f-g	750348,3625		
g-h	401654,13		
h-i	586843,935		
TOTAL Bloque 1	5229472,215		

Una vez realizados todos los cortes geológicos, e implementado el método de secciones transversales, el volumen de roca determinado para cada bloque fue:

Bloque 1: 5'229.472,215 m³

Bloque 2: 6'174.643,558 m³

Luego, considerando una densidad teórica de la caliza = 2850 Kg/m³, se calculó el tonelaje de caliza; estos valores se muestran en la Tabla 10.

Tabla 9.

Reservas Probables de caliza, calculadas en total para el área de estudio, dentro de las áreas definidas como Bloque 1 y Bloque 2

Densidad teórica de la caliza	Volumen total de roca (m ³)	Toneladas de Roca Caliza
2500Kg/m ³	11404115,77	28'510.289,43

Las tablas con los datos de entrada para el cálculo de volumen de roca (intervalos de interés de cada corte, áreas transversales, volúmenes entre cortes y volúmenes totales) se encuentran en el anexo E, junto a los cortes geológicos utilizados.

A partir de los datos obtenidos mediante la campaña de campo, el desarrollo de técnicas instrumentales como el DRX y el MEB en las muestras seleccionadas de interés y el conocimiento de la cantidad de roca caliza aflorante en el área, el recurso se categoriza como *Recurso Indicado* y las reservas calculadas corresponden a *Reservas Probables* las cuales suman un total de 28'510.289,43 Toneladas.

9. Discusión

El primer aspecto a discutir es la cartografía. Los trabajos de mapeo geológico preliminares, y que involucran directamente la zona de estudio, se realizaron a escalas pequeñas: 1:400.000 en Royero y Clavijo (2001) y 1:100.000 en Ward *et al.* (1973). Fue precisamente este, uno de los aspectos que más motivó el desarrollo de este proyecto.

Mapa geológico del cuadrángulo H-12 (en adelante llamado *Mapa Geológico de Referencia, MGR*) es el único que permite realizar una comparación directa en cuanto a los ya mencionados productos cartográficos; por lo tanto, a continuación, se expondrán los rasgos y aspectos geológicos más relevantes determinados durante nuestra campaña de campo y que tanto coinciden o difieren de los ilustrados en el **MGR**.

Las dos fallas mapeadas hacia el centro de la zona (Falla Hércules y Falla el porvenir) convergen hacia el norte y tienen indicadores geomorfológicos que permiten asegurar su proyección hacia el sur, con una tendencia NW-SE, similar al de la Falla Bucaramanga; situación que no se refleja en el MGR.

Se reconoció un patrón de fallamiento en sentido ENE-WSW, es decir oblicuo a los lineamientos mencionados anteriormente, presentan cinemática dextral (ejemplo: Falla La Clandestina) y pese a que no se encuentran ilustrados en el **MGR**, su dirección y/o cinemática concuerda con otras fallas que si están reportadas entre el límite Norte del nuestra área de estudio y la población de Rionegro. Identificada la tendencia en rumbo de estas Fallas, y la orientación de los cuerpos Andesíticos cartografiados en el área de estudio se puede inferir o proponer, que el emplazamiento de dichos cuerpos magmáticos haya sido favorecido o determinado por este patrón de fallamiento.

La Formación Bocas presenta el mayor grado de deformación respecto a las otras Formaciones. Se encuentra invertida hacia el Este, (hacia el contacto con la formación Diamante), apreciación que coincide con: “*Al Norte de la sección tipo, el contacto con el Diamante puede ser normal, pero la sección parece estar invertida.*” Ward *et al* (1973) pag.51. Hacia la parte central del área de estudio, presenta un alto grado de deformación cataclástica, producto de la acción de la zona de daño de las Fallas Hércules y El porvenir. Hacia este sector se identificaron también 2 pliegues. Un sinclinal cuyo eje de charnela tiene vergencia al W y un anticlinal. Fue cerca al núcleo del sinclinal1 donde se reporta la presencia de wacstones de ostrácodos y terrígenos. Dichas calizas fueron consideradas inicialmente como de posible interés económico, sin embargo, la compleja situación estructural que rodea estos niveles es, como ya se mencionó, muy alta, (Estas características fueron observadas en un afloramiento relativamente nuevo en la Finca Villa Claudia. Además, una vez finalizado el análisis petrográfico, se determinó que su porcentaje de carbonaros era demasiado bajo (<60%).

- **Contenido Fósil.**

El contenido fosilífero que reporta Ward *et al.* (1973) En la Formación Diamante y Formación Bocas concuerda perfectamente con lo visto en la campaña de campo y en la petrografía, sin embargo, en este trabajo es la primera vez que se nombra la presencia de fragmentos de troncos en arenitas calcáreas de grano fino en la Formación Bocas, estos afloramientos ubicados el margen izquierdo del desvío de la vía Bucaramanga – Rionegro que lleva al corregimiento de Bocas.

• **Implementación del DRX y MEB como técnicas analíticas**

La selección de estas dos técnicas para la obtención de datos en la fase de laboratorio se realizó basadas teniendo en cuenta sus puntos a favor y en contra, estos se describen en el siguiente diagrama:

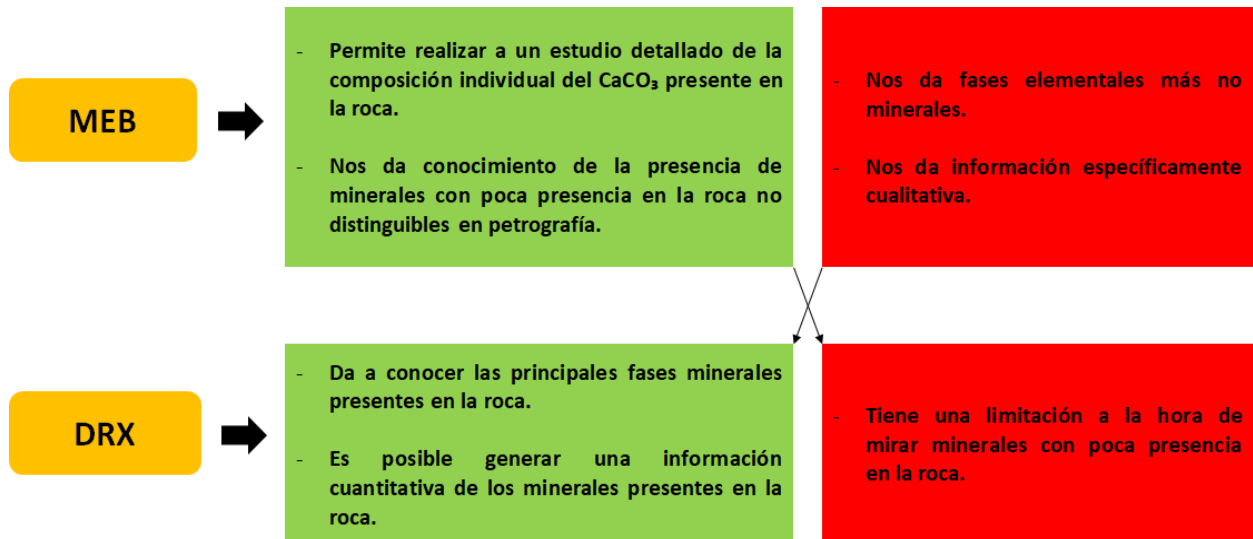


Figura 92. Diagrama mostrando las falencias (color rojo) y puntos a favor (color verde) de las técnicas analíticas utilizadas)

Basados en la Figura 92, se puede observar cómo estas dos técnicas instrumentales se complementan una a otra en sus respectivas falencias, por lo tanto, a la hora de obtener un resultado composicional por medio de la implementación de estas dos técnicas se puede tener un resultado bastante fiable.

• **Petrografía y MEB**

Debido a que las secciones delgadas seleccionadas y analizadas por medio de la petrografía y la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) son las mismas es posible realizar una correlación con el fin de confirmar si los datos obtenidos en cada análisis son coherentes entre sí:

a) Sección delgada CC1-M1

Los resultados recopilados en la petrografía de esta muestra dan como componentes principales la presencia de Calcita reflejada en los bioclastos o en la matriz de la roca (Ver Figura 43), es decir que composicionalmente esta roca es muy homogénea y pura, por medio de los resultados arrojados por medio del MEB (Ver sección 8.3.1) se corrobora lo anterior dicho debido a que en todos los análisis puntuales y por ventana realizados arrojan principalmente la presencia de Ca, y además se aporta el conocimiento de procesos leves de Dolomitización debido a la presencia de Mg en la muestra lo cual no fue posible distinguir en petrografía debido a la homogeneidad composicional presente-

b) Sección delgada CC5-M1

La petrografía de esta sección es muy similar a la CC1-M1 es decir que el componente mineral principal es la Calcita, la diferencia está en que la presencia de bioclastos es mayor en esta sección (Ver Figura 44), los resultados por medio del MEB confirman la presencia de otros posibles minerales como el Cuarzo esto debido a procesos de Silicificación dentro de algunos minerales como la plagioclasa que antes fueron remplazados por Calcita, también se dan procesos leves de Dolomitización debido a la presencia de Mg, también se confirma la presencia de algunos intraclastos (Ver Figura 55) en la roca sin embargo estos aparecen en una proporción muy mínima en la roca la cual no afecta el grado de pureza de la roca en grades rasgos. Además, se observa la presencia de arcillas debido a la presencia de Al y Si en algunos puntos, esto no fue posible diferenciarlo en petrografía.

c) Sección delgada CC12-M1 y CC12-M2

Debido a que su composición mineralógica es muy similar se describieron sus componentes en una sola sección (Ver sección 8.2.2.1), a comparación de las calizas de la Formación Diamante estas calizas de la Formación Bocas tienen un aporte terrígeno bastante considerable, en la petrografía se muestra una relación aproximada de 60%/40% (Ver Tabla 1 y 2) siendo los carbonatos de calcio (Micrita, Esparita y Bioclastos) los de mayor aporte composicional y los terrígenos (Materia orgánica, fragmentos de roca, Cuarzo, Plagioclasa y Feldespato K) con menor presencia.

Los análisis por medio del MEB confirman que la matriz de la roca no está compuesta solamente por carbonatos de calcio, también tiene un importante e incluso mayor aporte terrígeno debido a la alta presencia de Si y otros elementos como el Mg, Na y Al en varios puntos analizados (Ver sección 8.3.3 y 8.3.4), también se da un mayor conocimiento composicional de los extraclastos encontrados en la petrografía los cuales están compuestos principalmente por plagioclasas sódico-cálcicas de origen volcánico y así mismo se genera un nuevo insumo de información composicional sobre esta unidad.

d) Sección delgada CC30-M1

Mineralógicamente es la muestra que presenta mayor variedad composicional esto debido a que tiene un origen ígneo y sufrió metamorfismo hidrotermal, los resultados de la petrografía dan como componentes principales la Plagioclasa y Augita en la matriz, también hay la presencia de minerales secundarios como Calcita, Clorita, Zeolitas y Epidota generados por fluidos hidrotermales los cuales rellenan las vesículas presentes (Ver Figura 47) y algunos accesorios como la Hematita y otros óxidos de hierro. El MEB se utilizó principalmente para confirmar la

presencia de las zeolitas en la muestra (Ver Figura 75) y los componentes mineralógicos de la matriz (Ver Figura 76), esto con el fin de generar un aporte más certero sobre la composición de esta unidad al norte de Bucaramanga este insumo generado por medio de la petrografía realizada y el MEB sobre esta sección delgada.

- **Aspectos mineros**

El cálculo de reservas está basado únicamente en la recopilación de datos de geología de superficie, permitiendo tener una idea de la extensión que alcanza el recurso a ser explotado. También se tienen datos precisos de la calidad del recurso mediante técnicas avanzadas.

Basado en esto se categoriza como **Recurso mineral Indicado** para calcular las **Reservas Probables**. No se podrá precisar **Reservas Probadas** hasta realizar estudios y perforaciones que permitan detallar la presencia total del recurso a explotar y así mismo generar un modelo digital.

10. Conclusiones

Se cartografió un total de 4.8 Km², se identificaron cuatro unidades litoestratigráficas (Fm. Diamante, Fm. Bocas, Fm. Jordán y Cuaternario Aluvial) y 2 unidades litodémicas (Batolito de Rionegro y Dique Andesítico). El cambio más evidente dentro de este proceso de refinamiento de la cartografía es el mapeo de la unidad litodémica definida como Dique Andesítico, ubicado en el sector norte del área de estudio y que se encuentra intruyendo la Formación Jordán y la Formación Bocas.

Desde el punto de vista de la geología estructural, y a partir de la cartografía realizada en este trabajo, se definieron dos patrones de fallamiento a nivel del área de estudio. El principal con tendencia NW-SE, paralelo a la Falla Bucaramanga, y con cinemática sinistral. El segundo patrón de fallamiento sigue una tendencia NE-SW, es decir, es oblicuo a los lineamientos del patrón uno, generalmente presentan cinemática dextral y su estructura más representativa es la Falla La Clandestina. Se identificaron también cuatro pliegues (anticlinal 1 y 2; Sinclinal 1 y 2) con cabeceo al W, afectando principalmente a la Formación Bocas en su parte central.

Se levantaron dos columnas estratigráficas detalladas de la Formación Diamante, en las cuales se evidenció un alto grado de homogeneidad litológica, es decir, no existen intercalaciones con rocas terrígenas que puedan afectar el volumen de recurso mineral.

Se descarta como unidad de interés económico las calizas de la Formación Bocas debido a su alto contenido terrígeno, el cual se determinó por medio del conteo de puntos realizados en las secciones delgadas CC12-M1 y CC12-M2.

La Formación Diamante es la unidad sedimentaria que presenta el mayor potencial económico dentro del área de estudio. El control de campo evidenció que su continuidad es buena y no presenta intercalaciones con capas de composición contrastante (terrígenos); los porcentajes de Calcita determinados a partir de las técnicas analíticas MEB y DRX permiten asignarle un grado de pureza muy alto.

Las 28,5 Millones de Toneladas calculadas como reservas probables de caliza, son evidencia que el área de estudio, es una zona de alto potencial para la minería de caliza, lo que debe ser visto como un impulsador económico para la comunidad aledaña y el posible surgimiento de nuevos pequeños mineros

Hay una evidente falencia en la implementación de las correctas prácticas de geología en la delimitación de los títulos mineros. El claro ejemplo dentro del área de estudio es que de las 3,7194Ha totales del título minero AGM-151; 1,5097Ha corresponden a Formaciones geológicas que no son de interés económico, es decir, material estéril; lo que en porcentaje representa un 40,59% de la superficie del título. Esto es evidencia de que la delimitación de un pequeño título minero, no tiene la fundamentación geológica requerida, esencialmente por el aspecto de la cartografía de detalle.

Referencias bibliográficas

ANM (2017). Código colombiano para el reporte público de resultados de exploración, estimación y clasificación de recursos minerales y reservas mineras. Recuperado de: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/ccrr_v1.docx.pdf

Ardila, D., Rangel, k., Pilonieta, C. (2016). Las rocas y minerales de carbonatos de Ca, Mg y Sr en la industria nacional: perspectivas de desarrollo. Documento Interno.

Bates, R. (1959) . Classification of the no metallic. Economic Geology. Vol. 54, pp. 248-253.

Bracamonte, A., Vertel, L., Cepeda, J. (Agosto de 2013). Caracterización físico-mecánica de agregados pétreos de la formación geológica Toluviejo (Sucre) para producción de concreto. Scientia et Technica, Vol. 18, No 2. Pp 429-436.

Clavijo J. y Royero J., (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1: 400.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá.

Dickey P., (1941). Pre-Cretaceous sediments in Cordillera Oriental of Colombia. Bulletin of the American Association of Pretroleum Geologists, 25 (9): 1789-1795.

Duda, W. (Ed). (1977). Manual tecnológico del cemento. Barcelona, España. Editores técnicos asociados, s.a.

Dunham, R. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. . Houston, Texas. 1962. p. 108-121.

Folk, R. L. (1962). Spectral subdivisión of limestones types, in Ham, W.E., (ed): classification of carbonate rocks a symposium, American Association of Petroleum Geologist Memoir 1, p. 62-84.

Folk, R. L. (1974). Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Pub. Co, Austin, Texas, pp 170.

Fuentes, C. (2006). Materiales de construcción en Guatemala y su aplicación actual. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala .

Gomis, V. (2007). Técnicas instrumentales de análisis industrial-Tema 6. ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X Y ELECTRONICA. Universidad de Alicante. España, pp 34. Recuperado de: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8250/4/T6rayosX.pdf>

Gonzales N. y Lazaro M., (1994). Estudio de las sedimentitas paleozoicas al N de Bucaramanga (Sector Vuagual – Los Colorados – Finca Cementos Diamante) Tomo I (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Ingeniería, 2003, 503 p.

Henan Zhengzhou Mining Machinery Co.,Ltd. (2016). *Definición de la caliza de alta pureza*. Recuperado de <http://www.zkmaschine.es/net/Noticias/270.html>

Julivert M., et al., (1968). Lexique Stratigraphique International, merique Latine Colombia Premiere Pare. Centre National de la Recherche Scientifique. 5, (4a), Colombie, 651 p. París.

Kogel, J., Trivedi, N., Barker, J., Krukowski, S. (Ed). (2006). Industrial mineral and rocks. Society for Mining, Metallurgy, and Explorations (SME), p7-11.

López, V. (2003). Fundamentos para la explotación de minas. México, UNAM, Facultad de

Mout, J. (1985). Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification. *Sedimentology*. Department of Geology, University of California. U.S.A. pp. 435-442.

Navarro, J.V. (2012). Diagnósis, alteraciones y evaluación de tratamientos en calizas y areniscas. II Encuentro de Conservación y Restauración de Materiales Pétreos: “Del laboratorio a la obra”. Museo de Pontevedra (España) pp22. Recuperado de: http://www1.museo.depo.gal/resumenes/Jose_Vicente_Navarro.pdf

Navas J., (1962). Geología del carbonífero al Norte de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Boletín de Geología, (11): 23-34.

Perez, A. (2015). ¿Qué son los commodities? Finanzas y Economía. Madrid. España. Recuperado de: <http://www.finanzas.com/¿que-son-los-commodities>

Pérez, E. (2012). La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio- Técnicas de caracterización petrológicas (I): Microscopía óptica de polarización (MOP) y Difracción de rayos x. Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Dpto de Geomateriales. Madrid.España, pp. 210. Recuperado de: http://eprints.ucm.es/14681/1/2012_publicacion_curso_geomateriales_con_ISBN.pdf

Pimentel, C. (2017). Síntesis y reactividad de minerales del grupo de la dolomita y fases análoga. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.

Rivera. Z. (2017) Estimación de Reservas. Recuperado de: https://www.academia.edu/7090200/Estimaci_n_de_reservas

Quintero J., (2011). Caracterización geoquímica de la roca fuente de hidrocarburos del paleozoico superior de las Formaciones Diamante y Tiburón, Cordillera Oriental, Colombia (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Ramírez, M. (2016). Estudio de la cristalografía y cuantificación por difracción de rayos x en materiales tipo hidrotalcita procedentes de la química del cemento. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. España.

Rojas, J. (2008). Estudio mineralización de carbonato de calcio usando como matriz quitosano y mezclas de quitosano con polímeros sintéticos hidrosolubles. Tesis de Pregrado. Universidad de Chile. Chile.

Secretaría de Economía de los Estados Unidos Mexicanos. (2014). *Perfil de mercado de la caliza*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5566/pm_caliza_2014.pdf

Sholle, P., Sholle, D. (2003). A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis., American Association of Petroleum Geologists. Memoir 77, pp 470.

Suarez J., (2005). Estudio geotécnico, Lote Cemex, Sector Norte de Bucaramanga. Consultado el 10 de Marzo del 2017. <http://es.calameo.com/read/00239748199e5c7b1eab3>

Tobón, J., Kases, R. (2008). Desempeño del cemento pórtland adicionado con calizas de diferentes grados de pureza. Dyna, Año 75, Nro. 156, pp. 177-184. Medellin, Noviembre de 2008.

Triviño, F. (1974. Julio, agosto, septiembre). Difracción de rayos x, Aplicaciones a la calidad en la construcción. Materiales de Construcción Vol. 24, n° 155, p 63-84

Trumpy D., (1945). El Pre-cretáceo de Colombia, Instituto Colombiano del Petróleo, Informe Técnico, N°9, (14): 1. Bogotá

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., y Restrepo, (1973). H. Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, Vol. XXI(1-3): 1 – 132.

Welton, J., (2003). SEM Petrology Atlas. Methods in Exploration Series No. 4. Chevron Oil Field Research Company. Association of Petroleum Geologists.

Whitney, D., Evans, B. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, Volume 95, pages 185–187.

YOUNG, H., FREEDMAN, R (Ed). (2009). Física universitaria, con física moderna volumen 2. México. México. Editorial Pearson.