

Caracterización y modelamiento geológico 3D de la mina La Nacuma, Mesa de Los Santos,
Santander

Julián David Mosquera Pérez, Sergio Fabián Sandoval Meneses

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogos

Directora

Ana Milena Cardozo Ortiz
M.Sc. Geología Ambiental

Codirectora

Ing. Geóloga Ana María Álvarez Ramírez

Universidad Industrial De Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2018

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado a Dios primero que todo por ser la fuente de amor y sabiduría en toda mi vida, acompañándome en los momentos más difíciles y felices de la misma.

A mis padres, para ellos todo mi amor y respeto, por su apoyo a lo largo de toda mi vida. Por ser mi fuente de inspiración y el más claro ejemplo de responsabilidad y perseverancia. Gracias a ellos soy lo que soy hoy en día.

A Mi hermana, siendo ella mi modelo a seguir, por motivarme a ser cada día mejor tanto profesional como personalmente.

A esos ojos hermosos que desde Febrero del 2015 han llenado de energía y alegría mis días, por su apoyo y amor incondicional.

A todas esas personas amadas que están o han estado en mi vida, gracias por sus enseñanzas, alegrías y buena energía.

Sergio.

DEDICATORIA

A Orlando y a Clara, mis padres, que han dado todo su esfuerzo, fe, motivación y amor para guiarme en el mejor camino de la vida, a ellos les debo todo lo que soy.

A mi familia, por todo el apoyo e incondicionalidad que me han brindado con su cariño.

A mis amigos y compañeros, por su lealtad y por todos los momentos que hemos compartido.

A Juanita, por alegrarme todos los momentos con su sonrisa y apoyarme en los momentos donde la luz del túnel se ve muy lejos.

Julian.

AGRADECIMIENTOS

A la compañía Cemex Colombia, por el apoyo económico y logístico brindado para la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Geología, por los conocimientos brindados durante la carrera.

A la ingeniera geóloga Ana María Álvarez Ramírez por su guía, seguimiento, sus enseñanzas, paciencia y todo el conocimiento que nos aportó para desarrollar este trabajo.

A la profesora Ana Milena Cardozo Ortiz por el apoyo y seguimiento al proyecto.

Al municipio de Los Santos, Santander por su hospitalidad y colaboración.

A nuestras familias por su apoyo incondicional y cariño en todo el transcurso de nuestra formación como personas integra para la sociedad.

A nuestra compañera y colega Denissary Rueda Rueda por acompañarnos en el trabajo de campo.

Finalmente, a todas las personas que nos aportaron, nos brindaron su apoyo y nos acompañaron a lo largo nuestra formación profesional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	18
1. Justificación	20
2. Objetivos.....	21
2.1.Objetivo General.....	21
2.2.Objetivos Específicos.....	21
3.Localización.....	22
4.Marco Teórico	24
4.1.Cartografía	24
4.1.1.Cartografía geológica.....	24
4.1.2.Carta cartográfica.....	27
4.1.3.Mapa geológico.....	31
4.1.4.Cartografía en Colombia.....	33
4.2.Estratigrafía.....	35
4.2.1.Principios fundamentales de la estratigrafía.....	36
4.2.2.Análisis estratigráfico	37
4.3.Fluorescencia de rayos X	38
4.3.1.Definición, ventajas y desventajas	38
4.3.2. Aplicaciones de la fluorescencia de rayos X.....	40
4.3.2.Fluorescencia de rayos X en la industria del cemento.....	42
4.4.Conceptos básicos del cemento.....	43
4.4.1. Definición	43
4.4.2. Propiedades del cemento.....	44
4.4.3. Cemento Portland.....	45
4.4.4. Clasificación del cemento Portland	46
4.4.5. Materias primas para la fabricación del cemento	47
4.5. Conceptos básicos del yeso.....	50
4.5.1.Mineralogía.....	51
4.5.2. Química del yeso.....	52
4.5.3. Ambiente de formación.....	53

4.5.4. Yeso en Colombia.....	54
4.5.5. Yeso en el cemento	56
4.5.6 Criterios sobre la explotabilidad de un yacimiento de yeso	56
4.5.7 Mina La Nacuma	58
5. Metodología.....	59
5.1. Metodología de campo.....	59
5.1.1. Cartografía superficial.....	59
5.1.2. Estratigrafía superficial	65
5.1.3. Muestreo del miembro yesífero dentro de las minas para los análisis de laboratorio	68
5.2. Metodología de oficina	73
5.2.1. Realización del mapa geológico digital.....	73
5.2.2. Análisis petrográfico en secciones delgadas.....	74
5.2.3. Digitalización de la columna estratigráfica	76
5.2.4. Elaboración del modelo geológico	77
5.2.5. Preparación de muestras en el laboratorio	78
5.2.6. Análisis químico del potencial productivo de la mina.....	79
6. Marco de Referencia	82
6.1. Marco geológico regional	82
6.2. Marco geológico local.....	87
6.2.1. Geología general de la Mesa de los Santos	87
6.2.2. Geología del área de trabajo.....	88
6.2.3. Geología estructural	95
7. Resultados.....	97
7.1. Petrografía	98
7.1.1. Chaqueta 2	98
7.1.2. Chaqueta 1	100
7.1.3. Lajeo	101
7.1.4. Churca 2.....	102
7.1.5. Churca 1	103
7.2. Análisis estratigráfico	104
7.2.1. Niveles estratigráficos de la Formación Rosablanca	109
7.2.2. Ambiente de depósito.....	112
7.2.3. Modelo geológico de la mina	114
7.3. Geoquímica de la mina	119
7.3.1. Análisis de la química en los niveles yesíferos	121

7.3.2. Evaluación general del potencial de yeso en la mina	132
7.3.3. Análisis químico en zonas externas a los mantos productivos	135
8. Conclusiones.....	138
9. Recomendaciones	141
Referencias Bibliográficas	142

Listado de Figuras

<i>Figura 1.</i> Mapa de localización del área de interés con la geología presente en la zona. Tomado y modificado de la plancha topográfica 135 (IGAC) y Google Earth Pro 2017.	22
<i>Figura 2.</i> Ubicación del cuadrante perteneciente a la mina La Nacuma. Tomado y modificado de Google Earth Pro 2017.	23
<i>Figura 3.</i> Planos de referencia dimensional. Tomado de Escobar, 2010.	25
<i>Figura 4.</i> Proyección lineal de un punto P dimensional (x, y, z) (Derecha); proyección lineal del punto P sobre el plano de valores “z”, visto desde arriba. (Valor z = cota). Tomado de Escobar, 2010.	26
<i>Figura 5.</i> División de la tierra. Derecha: División en meridianos (Arriba Derecha) y paralelos (Abajo Derecha) y. Izquierda: Medidas de Longitud (Arriba Izquierda) y Latitud (Abajo Izquierda). Tomado de IGAC, 2007.	28
<i>Figura 6.</i> Formas de expresión de la Escala. Tomado de IGAC, 2007.	29
<i>Figura 7.</i> Componente de un Mapa. Tomado de IGAC, 2007.	31
<i>Figura 8.</i> Mapa Geológico Colombiano. Tomado Gómez, et al., 2015.	35
<i>Figura 9.</i> Técnica de Fluorescencia de rayos x donde se ilustra la Radiación primaria y secundaria. Tomado http://www.abts.org.br/boletim/newsletter/2012/espanol/mar/boletin_as_6_mat1.html	39
<i>Figura 10.</i> Ciclo geológico de los sulfatos de calcio naturales. Tomado de Sanz, 2009.	54
<i>Figura 11.</i> Panorámica de la zona de campo, tomado en el reconocimiento de campo, donde se observa el estilo de pendiente escarpado, que predomina en la zona de trabajo. Vista al oeste.	60
<i>Figura 12.</i> Trayecto definido para recorrer y reportar las estaciones de los afloramientos para la cartografía de la zona de campo (Línea roja). Tomado y modificado de Google Earth Pro 2017.	61
<i>Figura 13.</i> Estación MNC_01_01 donde se observan una intercalación de margas negras con alto contenido de fósiles con unas calizas wackestone negras. Vista al Este.	62
<i>Figura 14.</i> Página 1 de la Planilla de campo (CEMEX), que se empleó para la descripción geomorfológica (paisaje de la zona), litología que aflora en la estación y el dato estructural de diferentes rastros geológicos que se observan, como la estratificación de las rocas, estrías de fallas, etc.	63
<i>Figura 15.</i> Página 2 de la Planilla de campo (CEMEX) que se empleó para la descripción de las estaciones. En esta parte de la planilla permite dibujar esquemas que permitan entender mejor la disposición del afloramiento.	64
<i>Figura 16.</i> Tramo de las secciones de levantamiento de la columna estratigráfica en la zona de trabajo. Las líneas de los tramos de color naranja corresponde a la sección de la Formación Rosablanca que está cubierta por un depósito aluvial y los tramos con la línea de color rosado es la sección horizontalizada de la Formación Rosablanca donde no fue posible levantar una columna estratigráfica. Tomado de Google Earth Pro 2017.	66
<i>Figura 17.</i> Ilustración del método de bastón de Jacob en campo. Se muestra cómo se orienta el bastón con respecto a la inclinación de los estratos, para describirlos litológicamente en su disposición real. Vista al Noreste.	67
<i>Figura 18.</i> Ilustración de los tres principales niveles de explotación de yeso en el túnel 8 dentro de la mina de la mina La Nacuma. Vista al Noroeste.	69
<i>Figura 19.</i> Niveles productores señalizados en la bocamina de Nacuma. La visibilidad de la luz del día permitió a identificar la disposición de las capas. Vista al Norte.	69

Figura 20. Representación teórica del método de chip para la toma de muestras de partículas para el análisis de laboratorio. El muestreo se realiza de modo disperso, como se ilustra en los puntos de color en cada capa, obteniendo una muestra representativa de la capa de interés..... 70

Figura 21. Representación teórica del método de chip para la toma de muestras de partículas para el análisis de laboratorio. El muestreo se realiza de modo disperso, como se ilustra en los puntos de color en cada capa, obteniendo una muestra representativa de la capa de interés..... 71

Figura 22. Esquema de las etiquetas (CEMEX) para las muestras tomadas para el análisis de laboratorio. 71

Figura 23. Toma de las muestras en uno de los frentes de avance de la mina Nacuma 72

Figura 24. Toma de las muestras en uno de los frentes de avance de la mina Nacuma. 73

Figura 25. Microscopio de luz reflejada NIKON ECLIPSE E200 50/POL empleado para analizar las secciones delgadas. Tomado de la página https://www.nikoninstruments.com/es_AMS/Productos/Microscopios-verticales/Investigacion/Eclipse-E200-POL. 76

Figura 26. Depósito de las pastillas prensada en el porta-muestra y luego en la cámara de muestras del espectrómetro de fluorescencia de rayos X. Tomado de Cemex, Colombia (2017). 79

Figura 27. Mapa de la localización de las estaciones desarrolladas en el muestreo de la mina. 80

Figura 28. Evolución geológica de Colombia. Tomado Cooper, 1995. 84

Figura 29. Imagen de la separación de los andes colombianos en 3 ramas que hacia el Norte se convierten en una sola. Tomado de www.todacolombia.com 85

Figura 30. Contacto neto en campo entre las Formación Rosablanca (Kir) y Paja (Kip). Vista al Sureste.. 90

Figura 31. Vista panorámica de la secuencia estratigráfica en la ladera escarpada del Cañón del Chicamocha, donde se infirieron los contactos de las unidades lito-estratigráficas identificadas teniendo como parámetros el color de las capas, el estilo de la pendiente y la bibliografía existente sobre estas unidades. Se observa la extensión de la Formación Los Santos y Rosablanca. Vista al Sureste. 91

Figura 32. Vista panorámica hacia el Oeste de los miembros de la Formación Rosablanca determinados en campo. Se observa el miembro yesífero Kry, el miembro de calizas compactas Krc y el miembro Krmc de calizas lodosas que es enterrado por un cuerpo cuaternario (Qd) en el tope del cerro. 93

Figura 33. Imagen de las dimensiones de depósitos cuaternarios identificadas en el mapa satelital de la zona de estudio. Tomada de Google Earth. 94

Figura 34. Mapa geológico de la zona de campo, donde se reconocieron los rasgos geológicos más relevantes en los afloramientos (para mayor detalle ir al Apéndice 1)..... 95

Figura 35. Corte geológico de la zona de estudio. Se observa la inclinación regional sub-horizontal de las capas con sentido NE – SW, observándose que las unidades lito-estratigráficas van acorde a la topografía. 96

Figura 36. Diagrama de polos, indicando la mayor tendencia de datos, y la tendencia de rumbo de la zona de estudio. Tomado de StereoNet 9.8.3..... 97

Figura 37. Sección delgada del nivel Chaqueta 2. A. Anhidrita con su forma radiada representativa. B. Cristales de Dolomitas. C. Yeso tabular en Vetillas. (Objetivo 10x)..... 99

Figura 38. Sección delgada del manto Chaqueta 1. Se puede observar la forma de “lentes” en que se presenta la anhidrita y el yeso, envueltos en el cuerpo algáceo. (Objetivo 10x). 100

Figura 39. Sección delgada del manto Lajeo. A. Se muestra la forma de “lentes” en las que se presenta el reemplazamiento del yeso. B. Bivalvo presente en la muestra. (Objetivo 10x). 101

<i>Figura 40.</i> Sección delgada del manto Churca 2. A. Disposición de los niveles de yeso, vetillas fracturadas. B. Presencia de Pellets en gran porcentaje. (Objetivo 10x).	102
<i>Figura 41.</i> Sección delgada del manto Churca 1. A. Disposición del yeso en forma de pequeñas vetillas irregulares. B. Presencia de alquímicos en la muestra Pellets y Bivalvos. (Objetivo 10x).	103
<i>Figura 42.</i> Representación de los niveles yesíferos en la sección 1, características físicas y químicas. Escala de la columna 1:50. Tomado de Sedlog 3.1.....	106
<i>Figura 43.</i> Contacto entre la Formación Rosa Blanca y la Formación Paja. Escala de la columna 1:50. Tomado de Sedlog 3.1.	109
<i>Figura 44.</i> Esquema donde se ilustra el ambiente de desarrollo de la Formación Rosa Blanca. Tomado de gaia.geologia.uson.mx.	113
<i>Figura 45.</i> Vista superior del modelo geológico de la mina, donde se pueden observar los puntos donde se realizaron las estaciones para el levantamiento de columnas dentro de la mina. Estos puntos tienen la misma orientación SW, hacia dónde se inclinan las capas.....	114
<i>Figura 46.</i> Correlación de espesores de las columnas levantadas a lo largo del túnel 8 de la mina, en dirección al buzamiento de la zona, donde se inclinan las capas hacia el SW.	116
<i>Figura 47.</i> Vista N del modelo geológico donde se observa la inclinación hacia el W del yacimiento. Tomado de Leapfrog v. 4.0.	117
<i>Figura 48.</i> Vista N2W del modelo geológico. Tomado de Leapfrog v. 4.0.....	117
<i>Figura 49.</i> Vista inclinada desde el SE del modelo, donde se observa los puntos tomados en la mina con inclinados en dirección NE-SW. Esto indica que los túneles fueron construidos en dirección del buzamiento regional de las capas de la zona. Tomado de Leapfrog v.4.0.	118
<i>Figura 50.</i> Tendencia de las concentraciones de SO ₃ en el manto de Lajeo en cada estación realizada dentro de la mina.....	122
<i>Figura 51.</i> Mapa de concentraciones de SO ₃ del nivel Lajeo.	123
<i>Figura 52.</i> Tendencia de las concentraciones de SO ₃ en el Primer manto de Churca en cada estación realizada dentro de la mina.	124
<i>Figura 53.</i> Mapa de concentraciones de SO ₃ primer manto del nivel yesífero Churca.	125
<i>Figura 54.</i> Tendencia de las concentraciones de SO ₃ en el Segundo manto de Churca en cada estación realizada dentro de la mina.	126
<i>Figura 55.</i> Mapa de Concentraciones de SO ₃ Segundo -Manto del Nivel Churca.	127
<i>Figura 56.</i> Tendencia de las concentraciones de SO ₃ en el Primer manto de Chaqueta en cada estación realizada dentro de la mina.	128
<i>Figura 57.</i> Mapa de Concentraciones de SO ₃ Primer manto del nivel yesífero Chaqueta.	129
<i>Figura 58.</i> Tendencia de las concentraciones de SO ₃ en el Segundo manto de Chaqueta en cada estación realizada dentro de la mina.	130
<i>Figura 59.</i> Mapa de Concentraciones de SO ₃ Segundo manto del nivel yesífero Chaqueta.	131
<i>Figura 60.</i> Mapa de Concentraciones Promedio de SO ₃ en el área de la mina.....	133
<i>Figura 61.</i> Relación entre los espesores de las columnas y el promedio de concentración de SO ₃ de cada estación donde se tomaron las muestras dentro de la mina.	136

Listado de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tipos de mapas geológicos.	33
Tabla 2. Proporción de CaCO ₃ y arcilla (incorporada junto con el carbonato de calcio) que guarden las rocas.....	48
Tabla 3. Tabla para la determinación de tamaño de grano de partículas y cristales, para los microscopios marca Nikon.	75
Tabla 4. Descripción de los códigos que se asignaron para las muestras tomadas en el frente de avance de explotación.	81
Tabla 5. Descripción de los códigos que se asignaron para las muestras tomadas en las columnas de soporte de la mina a lo largo de los túneles	81
Tabla 6. Valores generales de los porcentajes de SO ₃ arrojados por los análisis químicos de Laboratorios comparados con porcentajes de calidad	120
Tabla 7. Rango de los porcentajes de concentración de SO ₃ que se tuvo en cuenta para el mapa de isócronas de la mina.....	120
Tabla 8. Escala de porcentajes de SO ₃ y el número de muestras tomadas en cada manto productivo de la mina	121
Tabla 9. Promedio de las concentraciones de SO ₃ en cada manto de explotación de la mina.....	132
Tabla 10. Porcentajes de concentración de SO ₃ en el manto del nivel La Dura.	135
Tabla 11. Valores de los porcentajes de SO ₃ de las capas de yeso con laminaciones de yeso en la Formación Paja	137
Tabla 12. Proporción de CaCO ₃ y arcilla (incorporada junto con el carbonato de calcio) que guarden las rocas.....	140

Resumen

TITULO: CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D DE LA MINA LA NACUMA.*

AUTORES:

JULIAN DAVID MOSQUERA PEREZ

SERGIO FABIAN SANDOVAL MENESES**

PALABRAS CLAVES:

Yeso, Evaporitas, cemento, Fluorescencia de rayos X, Concentración de SO_3 .

La mina “La Nacuma” es una mina de Yeso ubicada en la parte Oeste del municipio de Los Santos, Santander y es una de las mayores productoras de este mineral, en la industria de la construcción el yeso cumple una labor de gran importancia. Es por esto que este estudio centra la atención en realizar un análisis profundo sobre la ubicación espacial, características geológicas, concentraciones de SO_3 de los niveles estratigráficos explotados por la compañía CEMEX Colombia en la mina “La Nacuma”.

Se realizó el estudio externo e interno mediante puntos de control para tener un dominio del comportamiento de los niveles estratigráficos ricos en yeso, mediante estos puntos se pudo determinar la forma tridimensional de la mina “La Nacuma” en este sector, posterior a tener el análisis físico se procedió a realizar un análisis químico mediante el estudio de Fluorescencia de rayos X y petrología de laboratorio para los mismos niveles estratigráficos, gracias a estos análisis se pudieron elaborar diferentes mapas de concentraciones de SO_3 con el fin de demostrar la calidad de este componente en las muestras tomadas al interior y exterior de la mina. Finalmente mediante la recopilación de estos datos se pudo determinar que los porcentajes concentraciones de SO_3 presente en la mina “La Nacuma son de muy buena calidad para la explotación de yeso en la industria cementera.

***Trabajo de grado. Modalidad investigación.**

****Escuela de Geología. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Universidad Industrial de Santander. Director: Ana Milena Cardozo Ortiz. Msc.**

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION AND 3D GEOLOGICAL MODELING OF THE NACUMA MINE. *

AUTHORS:

JULIAN DAVID MOSQUERA PEREZ

SERGIO FABIAN SANDOVAL MENESES**

KEYWORDS:

Gypsum, Evaporites, cement, X-ray fluorescence spectrometry, SO₃ Concentration.

La Nacuma is an underground gypsum mine in operation, it's located to the west part of the municipality of Los Santos, Santander. Its industrial mineral is one of the main raw materials for the cement production. Therefore, this study focuses on the deeply analysis of the spatial characterization, geological features, SO₃ Concentration and depositional environment of Formación Rosablanca's stratigraphic layers that have been developed by Cemex Colombia.

Through the representative measuring process in the studied area, by geographic points, stratigraphic sections were made in the gypsum mantles layers, for the processing of the three-dimensional model of the deposit in this mine.

The SO₃ quality rating of the Gypsum mantles was carried out by X-ray fluorescence spectrometry chemical analysis and Petrographic analysis. As a result of the data compilation of these analysis, SO₃ Rating maps were made for the purpose of showing the best rating areas of the mine. Finally, through the results obtained during the research is determined that SO₃ concentration percentages in La Nacuma mine are high quality for the Gypsum operation in the cement industry.

* Undergraduate Thesis. Investigation modality.

**Geology school. Physical Chemical Engineering Faculty. Universidad Industrial de Santander.
Director: Ana Milena Cardozo Ortiz. Msc.

Introducción

La palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión. Es un producto de origen mineral totalmente impermeable, y que, mezclado con agua, mantiene sus propiedades. Su dureza, resistencia y capacidad para adoptar distintas formas lo hacen idóneo para trabajos en construcción (Labahn, 1985, p.3). Una de las materias primas básicas para la producción de cemento es el yeso, el cual es un sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4\text{H}_2\text{O}$), de dureza 2 en la escala de Mohs y se relaciona su origen a procesos evaporíticos. El yeso es el mineral regulador del fraguado que es el proceso de endurecimiento del cemento (Labahn, 1985, p.10), debido a su aporte de SO_3 . Este mineral es añadido como materia prima a la molienda del cemento con la función específica de retardar el fraguado y facilitar su uso (Cemex, 2017, p.16).

Para la estimación de reservas de un yacimiento de yeso, es fundamental conocer las características estructurales y estratigráficas de éste, donde se pueda identificar diferentes discordancias que puedan estar afectándolo, debido a la disminución de la calidad o el efecto de estructuras geológicas, poniendo en contacto dos litologías completamente distintas. La elaboración del modelo 3D del yacimiento de yeso es una herramienta que puede aportar información geológica para identificar cómo están dispuestas las capas de yeso, determinar su calidad con respecto a su contenido de SO_3 e identificar las zonas con mejores concentraciones dentro de la mina, siendo este el resultado que se quiere mostrar en este informe en la mina Nacuma, en el municipio de Los Santos, departamento de Santander, con el apoyo empresa CEMEX que es una de las más grandes productoras de cemento en el mundo y la segunda en Colombia.

En base en este trabajo se quiere lograr el modelo geológico en tres dimensiones y evaluar el potencial de la mina, con el propósito de mejorar la efectividad de la producción de cemento, para impactar en un mercado cada más vez más competitivo en el país.

1. Justificación

El crecimiento exponencial de las poblaciones colombianas, las obras civiles, vías y demás construcciones han ocasionado un incremento en el desarrollo y mejoramiento de materias primas utilizadas para estos fines. Un ejemplo de esto es la industria del yeso, como sabemos el departamento de Santander en la zona del cañón del Chicamocha es la región que tiene los mejores yacimientos de yeso del país. Esta área es labrada por los ríos Chicamocha y Sogamoso, aledaña al municipio de Los Santos, departamento de Santander, 62 Km al sur de Bucaramanga, la cual posee yacimientos yesíferos con altos porcentajes de SO_3 , de óptima calidad de yesos.

La explotación de la mina “La Nacuma” se desarrolla en el cañón del Chicamocha, donde se presentan afloramientos de yeso en la base de la formación Rosablanca que han sido objeto de estudios demostrando presencia de reservas. A pesar de esto es necesario llevar un control con estudios recientes para confirmar la calidad de la materia prima y mejorar la efectividad de la producción entre otros aspectos.

Por esta razón, es necesario realizar en la zona de interés un estudio preciso que cubra detalles como estratigrafía, litología, características estructurales, concentraciones de SO_3 , espesores de los mantos de yesos y demás rasgos de la geología, obteniendo una información más reciente que sirve para generar un modelo geológico tridimensional de la mina “La Nacuma” y realizar a futuro la actualización de reservas y diseños mineros.

2. Objetivos

Este proyecto debe tener estipulado las metas a las que se piensan llegar, fines específicos y un fin general que abarque el resultado principal deseado.

2.1 Objetivo General

Elaborar un modelo tridimensional del yacimiento de yeso de la mina “La Nacuma” ubicada en el municipio de Los Santos con la ayuda del software Leapfrog v. 4.0.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar sedimentológicamente los niveles yesíferos de interés para dar un reconocimiento textural y composicional de las mismas.
- Realizar el mapa geológico a escala 1:2.000 de la zona de estudio, señalando límites estratigráficos, litología y características estructurales.
- Elaborar mapa de concentraciones de SO₃ de los niveles yesíferos de interés.
- Levantar secciones estratigráficas de la Formación Rosablanca, correlacionando con la sección tipo.
- Realizar el corte geológico respectivo del mapa con el fin de entender la geología estructural y la disposición de las unidades litoestratigráficas.

3. Localización

El área de estudio se encuentra ubicada en el sector N-W (Noroeste) de la cuenca Cordillera Oriental (CO), al Oeste del municipio de Los Santos y el municipio de Jordán, limita hacia el sur con el Río Chicamocha (Fig. 1 y Fig. 2). La zona de interés se encuentra entre las coordenadas: $X_1=1'235.000$ y $X_2=1'240.000$ Norte y $Y_1=1'095.000$ y $Y_2= 1'100.000$ Oeste, correspondiente a la plancha topográfica 135 a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.

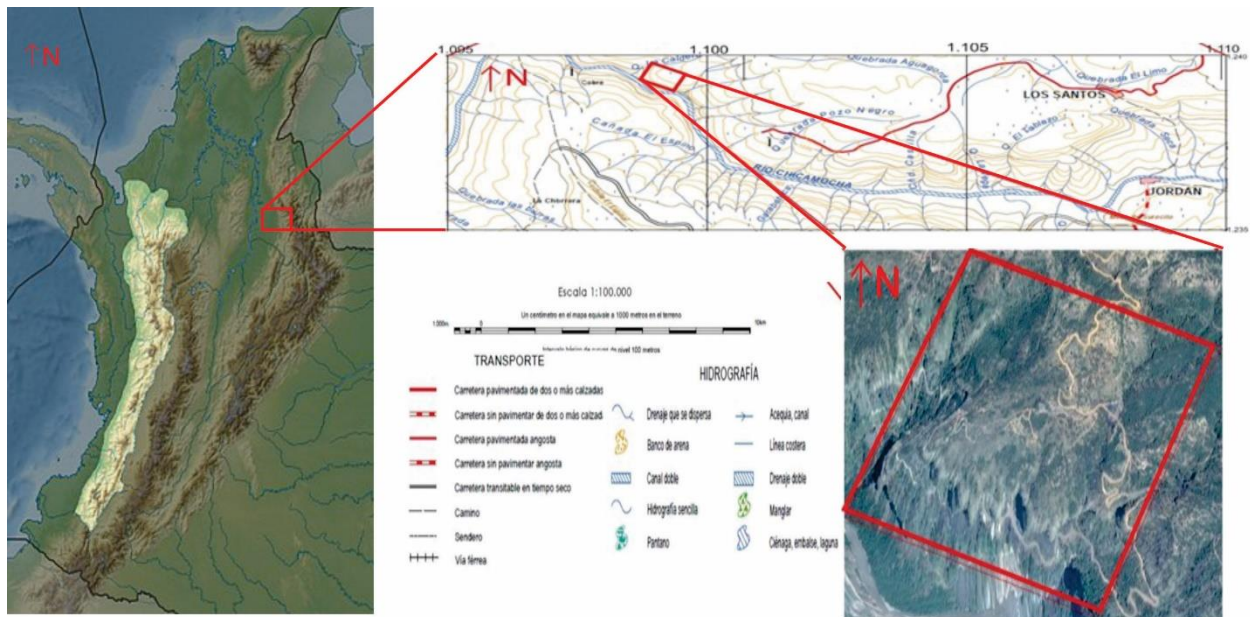


Figura 1. Mapa de localización del área de interés con la geografía presente en la zona. Tomado y modificado de la plancha topográfica 135 (IGAC) y Google Earth Pro 2017.



Figura 2. Ubicación del cuadrante perteneciente a la mina La Nacuma. Tomado y modificado de Google Earth Pro 2017.

4. Marco Teórico

El trabajo comprende una serie de temáticas geológicas tanto físicas como químicas, es por esto que en este capítulo del proyecto se explicará teóricamente los aspectos geológicos involucrados en el desarrollo del mismo.

4.1 Cartografía

Según el Servicio Geológico Colombiano - SGC (2013-2023), la actividad cartográfica es definida como la actividad por medio de la cual se inicia el estudio de la distribución, composición, estructura e historia geológica de las rocas y los sedimentos en la superficie y en el subsuelo y se reconstruye la evolución de esos materiales desde su formación hasta la actualidad.

4.1.1 Cartografía geológica

Este es el nombre utilizado para el desarrollo de diferentes técnicas cartográficas enfocadas en una zona de interés netamente geológico. Pueden consistir en delimitaciones tomando como base un mapa topográfico sobre la distribución de los diferentes tipos de rocas, la localización y naturaleza de los contactos entre los tipos de rocas y la localización y orientación de los rasgos estructurales principales.

4.1.1.1 Elementos de la cartografía geológica

Al momento de desarrollar una actividad cartografía con tópicos geológicos, el cartógrafo debe tener en cuenta todos los factores tanto externos como internos, matemáticos o técnicos que afecten al resultado final en la mayoría de los casos:

Planos de referencia

Por convención, se ha aceptado universalmente utilizar dos planos verticales y uno horizontal para las representaciones gráficas de los cuerpos (Fig. 3). Estos planos se interceptan uno a uno; y en un punto denominado “origen”, se interceptarán los tres. Las líneas de intersección plano a plano conforman ejes de giro (ejes cartesianos) que sirven de referencia lineal, es decir, para medir valores relativos a las diferentes dimensiones. Subdividiendo en intervalos iguales de medida a cada eje y asignando valores iguales a cada subdivisión, se cuenta con un instrumento que ha demostrado ser muy poderoso para la representación de los objetos. (Escobar, 2010. p. 2).

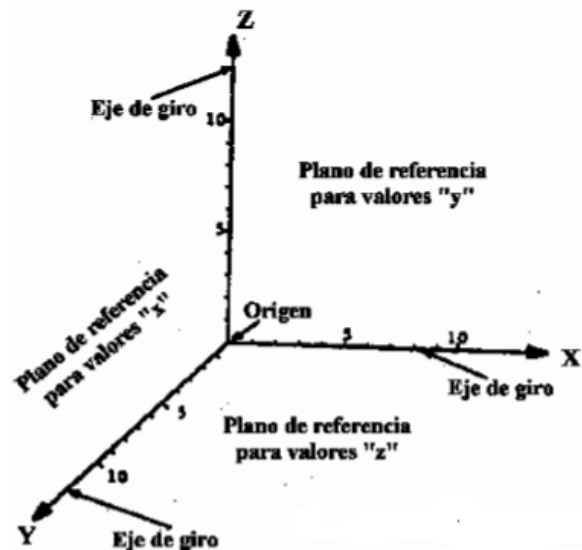


Figura 3. Planos de referencia dimensional. Tomado de Escobar, 2010.

Proyecciones

Las proyecciones juegan un papel importante en el desarrollo de la actividad cartográfica debido a que dependiendo de ellas se puede obtener realismo o distorsión según sea la utilizada. Una de las proyecciones más utilizadas a la hora de desarrollar un mapa representativo es la proyección Lineal, la cual, según Escobar (2010), si se pretende representar de manera gráfica un punto que está en el espacio, se puede referirlo a los tres planos dimensionales antes definidos, mediante la proyección lineal. Haciendo incidir tres rayos de luz sobre el punto (Fig. 4), siendo cada rayo perpendicular a cada uno de los planos, al chocar cada rayo con el plano al cual es perpendicular, lo hace en un lugar denominado punto de incidencia y este punto es la proyección lineal sobre el plano, del punto real.

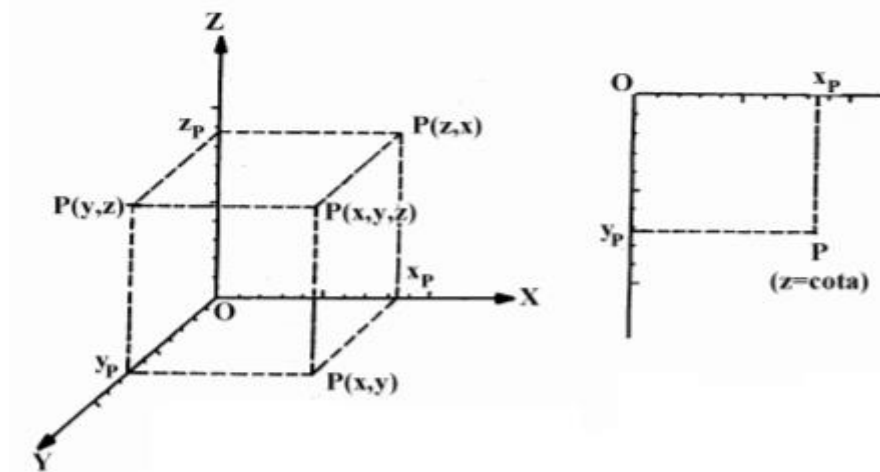


Figura 4. Proyección lineal de un punto P dimensional (x, y, z) (Derecha); proyección lineal del punto P sobre el plano de valores “z”, visto desde arriba. (Valor z = cota). Tomado de Escobar, 2010.

El relieve

El relieve comprende el conjunto de formas presentes en el terreno, elevaciones y depresiones y sus diferentes relaciones laterales. Son componentes del relieve, las montañas, los valles, las planicies, los taludes y demás elementos que conforman el paisaje natural.

La topografía

La topografía comprende el conjunto de técnicas de medición y representación de áreas de la superficie terrestre. La forma de representación que utiliza la topografía es el mapa topográfico, el cual es básicamente la proyección acotada de los terrenos con algunas especificaciones concernientes a las necesidades para las cuales se realiza. Un mapa topográfico es el que expresa la forma, dimensiones y distribución de los rasgos morfológicos de la superficie terrestre. Tales rasgos se clasifican en tres grupos: (a) relieve, incluyendo colinas, valles, llanuras; (b) hidrografía, que comprende mares, lagos, ríos, canales, marismas, etc.; y (c) obras y construcciones, incluyendo ciudades, ferrocarriles, vías, etc.

4.1.2 Carta cartográfica

El IGAC (2007) define una carta cartográfica o mapa como la representación total o parcial de la superficie curva de la Tierra sobre una superficie plana, casi siempre en una hoja de papel. Las cartas geográficas representan, con la necesaria minuciosidad, los diversos accidentes geográficos; además su sencillo manejo y fácil transporte las hacen muy útiles.

4.1.2.1 Componentes de los mapas

Debe ser fundamental en la representación gráfica de un mapa tener precisión siempre y cuando no se descuide la claridad en los datos que se quieren mostrar. Es por esto que se deben respetar los componentes de mayor importancia sobre los secundarios o por decirlo de alguna forma menos relevante, a continuación, se nombrarán algunos que según el IGAC (2007) son de importancia tenerlos en cuenta:

Coordenadas (1): Un sistema de coordenadas es un conjunto de valores que permiten definir inequívocamente la posición de cualquier punto de un espacio. Con el fin de identificar la posición exacta de un punto se utilizan coordenadas geográficas, las coordenadas geográficas se tratan de un sistema que divide el globo en anillos paralelos al Ecuador (paralelos) y anillos paralelos al Meridiano de Greenwich (meridianos) como se puede observar en la Fig. 5.

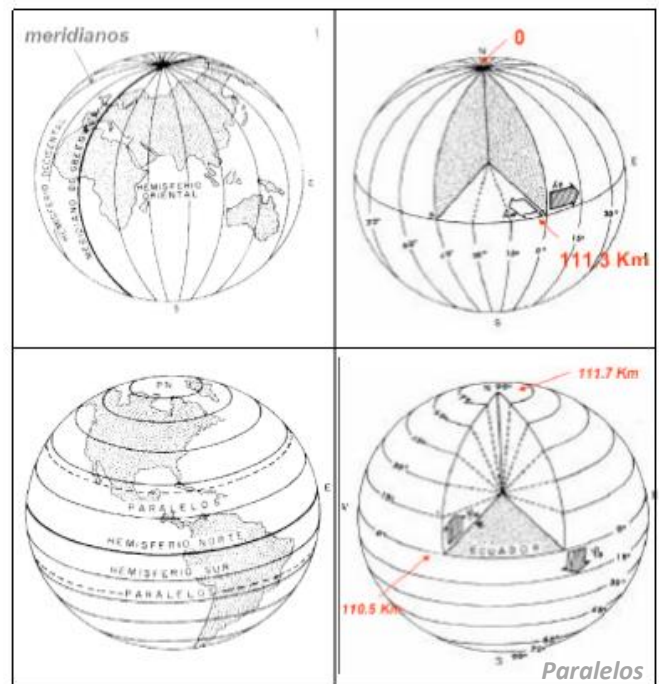


Figura 5. División de la tierra. Derecha: División en meridianos (Arriba Derecha) y paralelos (Abajo Derecha) y. Izquierda: Medidas de Longitud (Arriba Izquierda) y Latitud (Abajo Izquierda). Tomado de IGAC, 2007.

Escala (2): La escala se refiere a la relación dada entre la distancia real en un determinado terreno y su respectiva representación en un plano o mapa. El detalle que se busque obtener en un mapa depende directamente de la escala que se quiera utilizar; es decir si se quiere obtener un detalle mayor se utiliza una escala menor, por lo contrario, si se utiliza una escala mayor el detalle se va a ver reducido. Según el IGAC 2007 dependiendo del terreno de estudio y la necesidad de lo que se quiere plasmar existen 3 tipos de escalas: **1. Escala Natural**, se emplea cuando la distancia real en el terreno es igual a la plasmada en el plano (1:1). **2. Escala de Reducción**, este tipo de escala se emplea cuando el tamaño del plano es menor al tamaño de la realidad (1:50, 1:1.000). **3. Escala de Ampliación**, Cuando hay que hacer el plano de piezas muy pequeñas o de detalles de un plano se utilizan la escala de ampliación en este caso el valor del numerador es más alto que el valor del denominador o sea que el valor del plano lo tenemos que dividir por el denominador para conocer el valor real de la pieza (2:1, 10:1).

La representación de la escala en un mapa se puede hacer en 2 formas, de la forma gráfica que consiste en una regla con cuadros negros y blancos o de forma numérica como se muestra en la siguiente imagen (Fig. 6).



Figura 6. Formas de expresión de la Escala. Tomado de IGAC, 2007.

Simbología y Variables (3,4): Se refiere a la representación gráfica de las características físicas ya sean cualitativas o cuantitativas en un mapa, deben ser muy específicas y claras. Ejemplo: ríos, carreteras, casas, geofomas, puntos de referencia, etc.

Cara del Mapa (5): Superficie que contiene la información del Mapa, limitada por una línea llamada borde.

Límite Exterior (6): Marco opcional alrededor de la línea de borde.

Información del Borde (7): Figuras, marcas y coordenadas colocadas entre el límite exterior y el límite de borde.

Indicador del Norte (8): Flecha o símbolo que identifica la orientación del norte geográfico.

Título (9): Descripción más generalizada del contenido del mapa.

Leyenda (10): Área del mapa donde se describen los símbolos utilizados en la temática tratada

Rótulo (11): Espacio donde se incluyen elementos como la leyenda, en contenido del mapa e información adicional como observaciones o número del mapa.

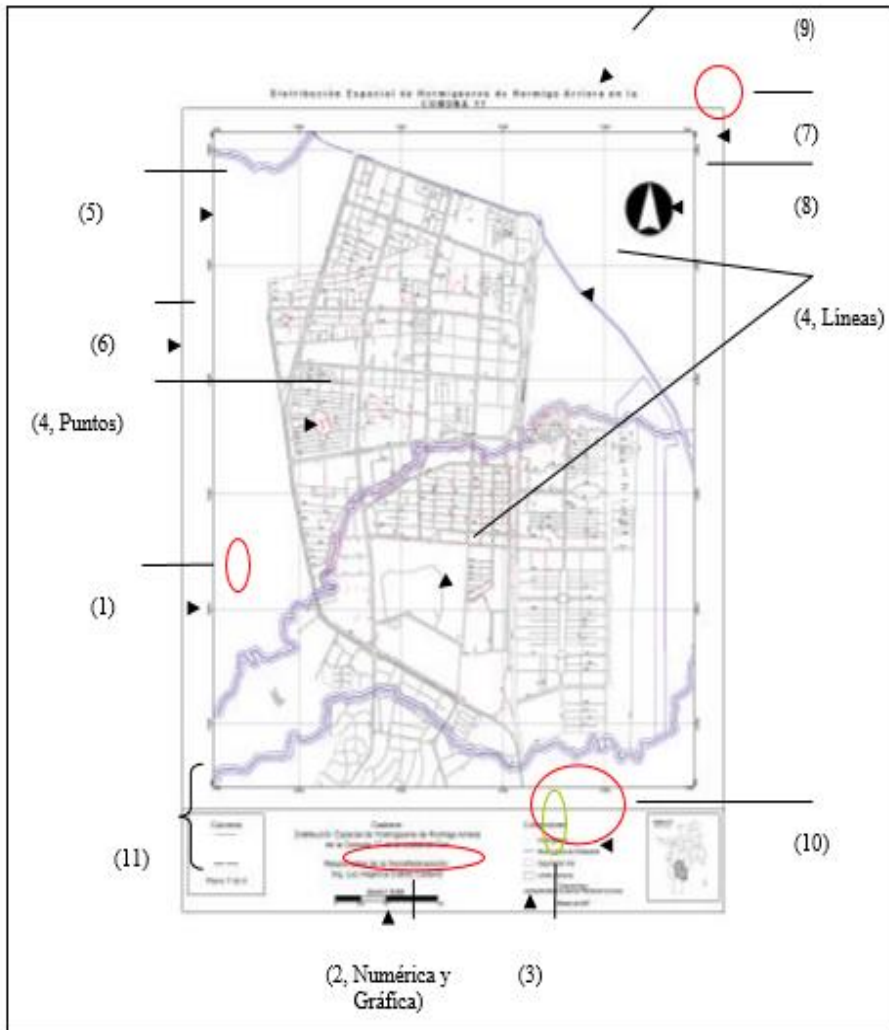


Figura 7. Componente de un Mapa. Tomado de IGAC, 2007.

4.1.3 Mapa geológico

Un mapa geológico es un documento de referencia a la vez científico y pedagógico en el que se muestra sobre un mapa topográfico la distribución de las rocas, los materiales superficiales no consolidados y las estructuras que los deforman. En la representación de estos rasgos se utilizan colores y tramados para indicar la edad y la composición de los materiales, y se adicionan símbolos para mostrar la distribución espacial de las estructuras (p. ej. fallas y pliegues). Además del conocimiento del terreno en un punto preciso, el mapa geológico permite deducir la

distribución de los materiales a profundidad a partir de la información superficial. En otras palabras, un mapa geológico es una representación de la geología de un área que tiene un profundo efecto sobre muchos aspectos, desde la forma como evoluciona el paisaje hasta el tipo de vegetación que mejor crece sobre los materiales geológicos, desde la disponibilidad de agua subterránea hasta la presencia de minerales útiles, desde la cantidad de movimiento sufrido durante un terremoto hasta la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, etc. Desde el punto de vista académico, es un documento fundamental ya que a partir de la información de un mapa geológico se puede interpretar la evolución de la Tierra. Por lo tanto, es indispensable para todos aquellos interesados en las geociencias y en la gestión sostenible tanto de los recursos naturales como del ambiente, incluyendo en este último aspecto la evaluación de los riesgos geológicos. (Gomez, *et al.*, 2015. p. 10)

Un mapa geológico debe proporcionar información sea cual sea el interés, pero generalmente según SELLES 2014 el mapa geológico normalizado debe incluir:

- Mapa mostrando la información geológica seleccionada (ubicación, edad, litología, estructura, etc.), Columna Estratigráfica, perfiles, esquemas complementarios (cortes adicionales, bloques diagrama, etc.), referencias (Rastras y símbolos), escala (gráfica y numérica), coordenadas y mapa de ubicación regional, dirección del Norte (geográfico y magnético), fecha de realización y autor/es.

Y la memoria explicativa que lo acompaña debe ocuparse de describir y explicar:

- Presentación y objetivos del mapa, metodología de realización, antecedentes, explicación del mapa, litología, estructura, geomorfología, historia geológica, paleontología, aspectos temáticos específicos, recursos económicos (minerales, hidrocarburos, etc.), hidrogeología, riesgos, bibliografía.

Este trabajo tiene como uno de sus objetivos específicos la realización de un mapa a escala 1:2.000 mostrando la litología, estratigrafía, y estructural del cuadrante otorgado, pero como se muestra en la Tabla 1 existen diferentes tipos específicos de mapas geológicos:

Tabla 1

Tipos de mapas geológicos.

Escala	Mapas generales	Mapas específicos	Mapas aplicados
> 1:10.000 (detalle)	Mapa geológicos	Litológicos	Mineros
Hasta 1:1.000.000		Geotectónicos Tectónicos Estructurales Cronológicos Morfológicos Peligrosidad y riesgo	Geotérmicos Geoquímicos Metalogénicos Hidrogeológicos Ambientales Usos del suelo
< 1:1.000.000	Mapas geológicos	Suelos Sismicidad Paleográficos Cuencas sedimentarias	Hidrotermales De metales, minerales o rocas

Nota: Modificado de Martínez-Álvarez, 1979 en Selles, 2014.

4.1.4 Cartografía en Colombia

En Colombia la entidad encargada de la actividad cartográfica del territorio colombiano desde su fundación es el SGC el cual según su informe (2013 -2023) ha levantado la cartografía geológica a diversas escalas, con un cubrimiento actual del 52 % del país, aproximadamente. Sin embargo, no toda esa área cumple con los estándares de esta escala de trabajo (esc. 1:100.000) y tiene

vacíos de información geológica que obligan a hacer planes de revisión y complementación; también se requiere mejorar la información de las áreas estratégicas del Estado.

El SGC (2013-2023), indica que el Mapa Geológico de Colombia se ha venido publicando desde 1943, con 10 versiones a diferentes escalas, entre 500.000 y 2'000.000. Estos se obtienen compilando y sintetizando la información generada por el SGC en la cartografía geológica básica a escala 1:100.000, al igual que en todos los levantamientos geológicos e investigaciones que se hacen en las universidades, en los sectores oficiales petrolero y minero, y en el sector privado.

La armonización del MGC (Mapa Geológico Colombiano) fue controlada usando imágenes de satélite Landsat T. M. y radar, así como las imágenes de relieve sombreado. Las unidades representadas se definieron de acuerdo a un sistema clasificatorio cronolitoestratigráfico. El MGC ha sido compilado usando ArcGIS 9.3.1 y el modelo de datos se diseñó e integró en una File Geodatabase corporativa que usa Oracle 10g y ArcSDE 8.3 para el manejo de los datos.

Actualmente el MGC consiste en 2 hojas, la hoja 1 es el mapa y la hoja 2 corresponde a la leyenda. La primera contiene como elemento principal el mapa geológico en sí mismo, con los territorios insulares que obedeciendo a la distancia que los separa de la parte continental y a su pequeña extensión, se incluyen en recuadros a escala 1:100 000 (Fig. 8).

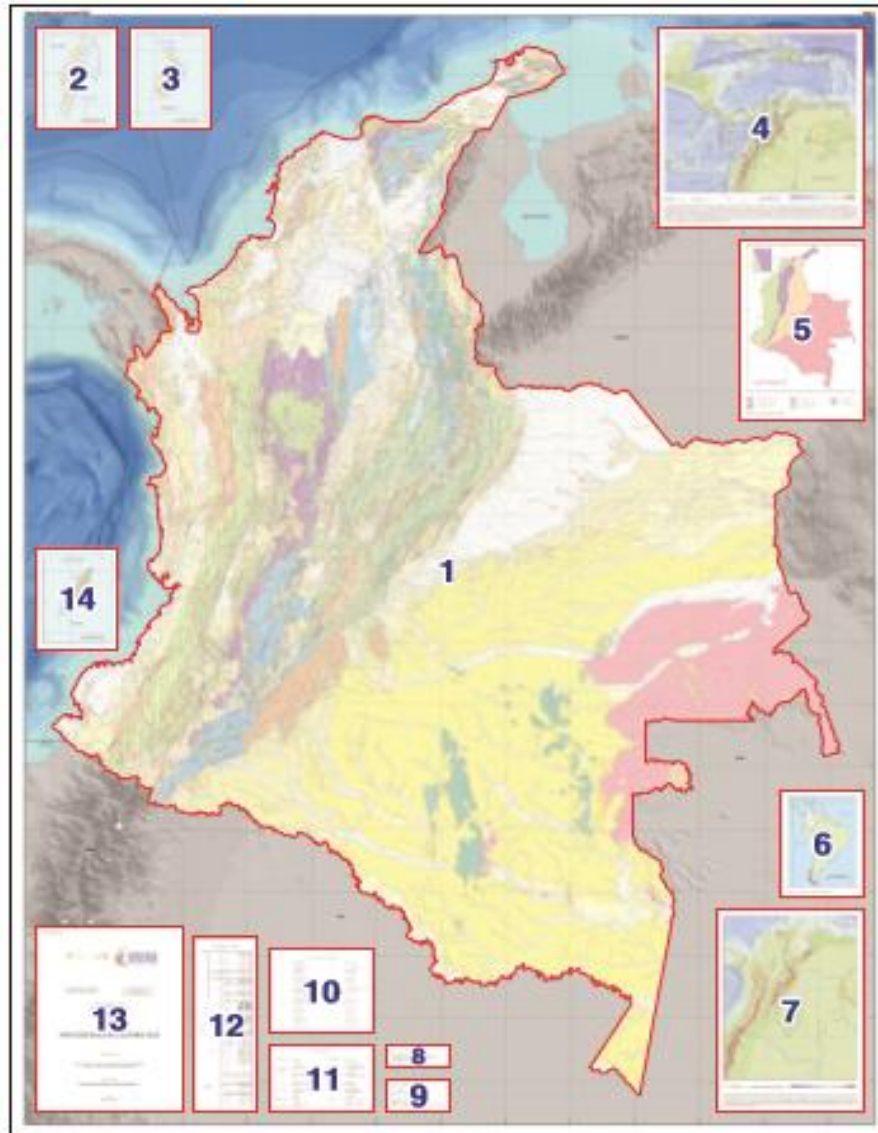


Figura 8. Mapa Geológico Colombiano. Tomado Gómez, et al., 2015.

4.2 Estratigrafía

El término Estratigrafía, del latín *stratum* y del griego *graphia*, alude etimológicamente a la “ciencia que trata de la descripción de las rocas estratificadas”, este concepto es dado de manera más completo por Vera (1994) que define a la Estratigrafía como una ciencia geológica que tiene dos enfoques diferentes y complementarios: el científico, cuyo objetivo es la ordenación temporal e interpretación genética de los materiales, y el aplicado, cuya finalidad es localizar

recursos naturales explotables y más recientemente contribuir a la planificación de la conservación del medio ambiente.

4.2.1 Principios fundamentales de la estratigrafía

La Estratigrafía como ciencia consolidada está regida a algunos principios aplicados y fundamentales mencionados a continuación:

- **Principio de la horizontalidad original y continuidad lateral de los estratos:** Este principio emitido por uno de los padres de la geología, Steno, expone que los estratos originalmente son depositados horizontales y paralelos a la superficie (Horizontalidad original) y a su vez son delimitados en su continuidad lateral por la geometría del espacio en que son depositados.

- **Principio de la superposición:** Propuesto de igual forma por Steno y desarrollado por Lehmann propone que en una deposición original de estratos la sucesión esta de forma que en la parte inferior se encuentran los estratos más antiguos y en la parte superior los más jóvenes. Se hace énfasis en el estado original ya que el concepto es delimitado para estratos que no han tenido afectación tectónica. Existen algunas excepciones donde no se cumple el principio, siempre ligadas a discontinuidades que impliquen etapas de erosión de materiales previos, de manera que los sedimentos nuevos se depositen en cavidades excavadas en el seno de los otros (p.ej. cuevas).

- **Principio del uniformismo o actualismo:** Emitido por Hutton y desarrollado más ampliamente por Lyell, dice que los procesos que han tenido lugar a lo largo de la historia de la Tierra han sido uniformes (uniformismo) y semejantes a los actuales (actualismo). El desarrollo de la teoría originaria lleva a su correcta aplicación como método de trabajo con algunas ligeras

correcciones. Una primera es considerar que los procesos no son totalmente uniformes, sino que han cambiado en el ritmo e intensidad, y además en ellos hay un factor no repetible como es los organismos que han ido cambiando de manera lineal (no cíclica) de acuerdo con las pautas establecidas en la teoría de la evolución.

- **Principio de la sucesión faunística o de la correlación:** Propuesto por Smith y desarrollado por Cuvier constituye la base de la datación relativa de los materiales estratificados. Consiste en admitir que en cada intervalo de tiempo de la historia geológica (representado por un conjunto de estratos o por formaciones), los organismos que vivieron y, que por tanto pudieron fosilizar, fueron diferentes y no repetibles.

- **Principio de la simultaneidad de evento:** Propuesto recientemente y basado en la ideología del catastrofismo este principio consiste en aceptar que en la naturaleza ocurrieron en tiempos pasados fenómenos normales como los que vemos en la actualidad, pero además otros raros y eventuales (eventos) que mayoritariamente coinciden con las grandes catástrofes. Algunos ejemplos son: cambios climáticos, cambios del nivel del mar, cambios en el campo magnético terrestre, grandes terremotos, explosiones de volcanes, etc.

4.2.2 Análisis estratigráfico

La estratigrafía como herramienta para el geólogo en campo y en oficina juega un papel muy importante en la interpretación espacio- temporal de los cuerpos de roca estudiados. Partiendo de lo anterior, se puede decir que la estratigrafía reúne todos los datos sedimentológicos y los ubica en el tiempo para poder así contar una historia con la ayuda de la geología histórica de lo que ocurrió y correlacionarla con otros eventos. Un concepto muy importante para la correlación es

el concepto de facies ya que como lo define Vera (1994), las facies de una roca estratificada, en un sentido abstracto, es el "conjunto de características litológicas (composición, textura y estructuras sedimentarias) y paleontológicas que definen a dicha roca y permiten su diferenciación de las demás; Esto es fundamental a la hora de correlacionar rocas ya que como poseen características propias y diferentes de las demás la ubicación espacio- temporal es mucho más fácil de encontrar y por consiguiente el análisis estratigráfico. Este análisis es definido por Schlumberger (2017) como el análisis de la historia, la composición, las edades relativas, la distribución de los estratos y la interpretación de los estratos.

4.3 Fluorescencia de rayos X

Debido a que está fue la técnica de laboratorio para la determinación de concentraciones químicas en las muestras se introduce un poco en los siguientes párrafos.

4.3.1 Definición, ventajas y desventajas

El avance tecnológico y científico ha permitido que se desarrollen técnicas muy sofisticadas de análisis que nos permiten llevar a cabo el estudio de muestras complejas de una manera eficiente y en tiempos muy cortos. Una de ellas es la espectrometría de fluorescencia de rayos X (EFR-X) o también conocida como fluorescencia de rayos X (XRF por sus siglas en inglés). Estas técnicas se han aplicado en la industria para determinar el contenido y la composición elemental con el fin de optimizar su explotación comercial o bien para control de calidad. Según Pizarro *et al.* (2009) define esta técnica como una técnica de espectroscopia atómica. Esta se basa en las transiciones de electrones de los átomos que se producen cuando una radiación electromagnética

de cierta energía incide con el material en estudio (Fig. 9), produciendo una excitación del átomo, el cual pasa de un estado basal (estable) a otro de mayor energía (inestable) de lo que resultan transiciones en diferentes estados energéticos en el átomo, los cuales son únicos para cada átomo en particular. Esta característica se utiliza para la identificación de los analitos o compuestos que queremos analizar, por lo que es de gran utilidad en el análisis cualitativo.

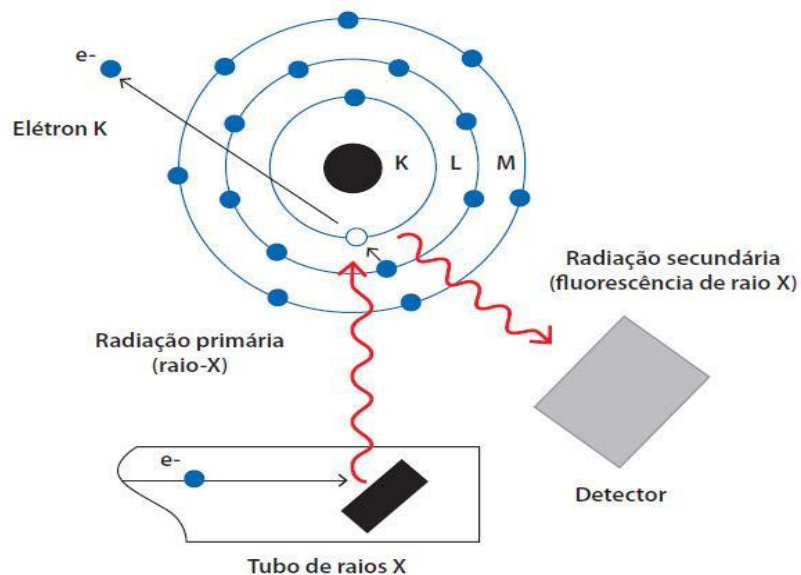


Figura 9. Técnica de Fluorescencia de rayos x donde se ilustra la Radiación primaria y secundaria. Tomado http://www.abts.org.br/boletim/newsletter/2012/espanol/mar/boletim_as_6_mat1.html

Este método como todos los métodos científicos posee sus ventajas y desventajas. Algunas de sus ventajas según Cabriaes (2002) se pueden mencionar a continuación:

- Selectividad.
- Técnica no destructiva.
- Análisis de sólidos, pastillas, polvos, líquidos o incluso gases, de materiales tanto metálicos como minerales, cerámicos, plásticos, textiles, papel, etc.
- Método relativamente rápido.

- Mejoría en el control de proceso.
- Análisis para amplios intervalos de concentración.
- Análisis multielemental para elementos con número atómico mayor al del flúor.
- Técnica sensitiva, con buena precisión y exactitud.

Por otra parte, Cabriales (2002) también menciona algunas desventajas del método:

- Dificultad para el análisis de elementos ligeros con número atómico menor al del flúor.
- La medición se realiza sobre una delgada capa superficial (< 0.01 mm).
- Las relaciones entre intensidad y concentración pueden ser seriamente afectados por la matriz (efecto matriz).
- Los estándares empleados para el análisis cuantitativo deben tener la misma composición química de la muestra, así como ser preparados de la misma forma en la que ésta sea preparada (pastilla, polvo, fundido, líquido).

4.3.2 Aplicaciones de la fluorescencia de rayos X

Dentro de las áreas en las que ha tenido más aplicación la fluorescencia de rayos X tenemos: arqueología, ciencias forenses, medicina, geología, recubrimientos, materiales, electrónica, farmacéutica y medio ambiente, entre otros. A continuación, se hace un breve detalle de estas aplicaciones. En arqueología, al analizar los objetos encontrados, conviene conocer los materiales utilizados en su manufactura para no llegar a dañarlos. También en los museos – especialmente a los curadores de obras de arte– esta técnica les resulta de mucha utilidad, ya que no daña de ninguna manera las pinturas, además de que permite identificar los pigmentos, tintas

o colorantes utilizados, saber su procedencia y verificar su autenticidad. También ha sido utilizado en aplicaciones forenses. Esta técnica es muy útil cuando se dispone de muy poca muestra. Un ejemplo es el análisis de residuos de descarga por arma de fuego para compararlos con los de alguna víctima o escena de un crimen. También se utiliza en la identificación de explosivos. En la medicina se ha usado para ver metales traza como mayoritarios en diferentes tejidos como piel o hueso o bien identificar la presencia de piedras en la vesícula. Por otra parte, en la geología se utiliza en la identificación de meteoritos y minerales. La propia naturaleza de penetración de los rayos X en los materiales permite su utilización en la industria de los recubrimientos, ya que se pueden analizar al mismo tiempo múltiples capas de recubrimiento; en el análisis de pinturas es muy importante. En la industria electrónica se utiliza con la finalidad de identificar contaminantes, como metales (plomo, cromo, mercurio, cadmio y bromo) en los circuitos electrónicos, la cuantificación puede ser debajo de 5 mg/Kg. En la industria farmacéutica apoya en el control de calidad, tanto de medicamentos como cremas, pastas dentales, cosméticos y talcos entre otros. Sirve para medir la homogeneidad de los productos o la calidad de mezclado de los ingredientes de las muestras o bien en la cuantificación de posibles contaminantes residuales en los productos finales. Otra aplicación importante es en las ciencias ambientales; estas pueden ir desde análisis de contaminantes en el suelo (plomo, cadmio, mercurio), identificación de elementos radiactivos (uranio), caracterización de materiales para reciclado y análisis de partículas en el aire por medio de análisis de filtros. (Pizarro, 2009. p. 3).

4.3.2 Fluorescencia de rayos X en la industria del cemento

En la industria cementera se presenta el desafío de adjuntar al análisis químico estándar por fluorescencia de rayos X (XRF, X-ray fluorescence), la determinación cualitativa de las distintas fases del cemento

El estudio de las microestructuras del cemento constituye un desafío constante para los especialistas que trabajan en esta área, principalmente debido a la composición mineralógica compleja y heterogénea. El cemento consiste de muchas fases diferentes a fin de lograr propiedades específicas, tales como la reactividad, el tiempo de fraguado, color, entre otros. Los cementos portland, utilizados comúnmente en la industria de la construcción, se basan ante todo

Por medio de las técnicas de caracterización mencionadas anteriormente, se puede lograr una comprensión del comportamiento de la pasta de cemento Portland durante el proceso de hidratación, lo que deriva en un conocimiento más real de los mecanismos de generación de propiedades como la resistencia y la durabilidad, las cuales son de las más importantes cuando se trata de seleccionar un cemento para una aplicación específica, y en nuestro caso muy particular, la retención de radionúclidos en las diferentes fases que se forman y evolucionan, y más concretamente las diferentes fases de silicato de calcio hidratado (CSH) a diferentes edades ya que son las responsables de las resistencias mecánicas de los materiales realizados con cemento Portland (Gutiérrez, 2014. p. 48)

En nuestro caso el análisis de fluorescencia de rayos X es fundamental a la hora de determinar el % de SO₃ presente en las muestras tomadas durante el proceso de recolección de campo. Esto con el fin de determinar si la sección analizada es apta para la explotación y posterior producción de cemento.

4.4 Conceptos básicos del cemento

El cemento se define como, “una mezcla de arcilla molida y otros materiales calcificados en polvo. Que después de un debido proceso, adquiere propiedades adherentes. Es considerado la materia prima más importante para el sector de la construcción” (Cañón, 2008. p. 6).

Según Cañón (2008), el proceso de fabricación se compone de cuatro etapas principales:

- **Extracción y molienda de materias primas:** La caliza es la materia prima principal del cemento, la cual se obtiene de recursos naturales. Ella es triturada hasta formar un material de un tamaño no mayor a 20 mm de diámetro, y posteriormente es almacenada junto con arcilla y otras materias primas.
- **Homogenización de la materia prima:** Aplicando la dosificación adecuada, se crea una mezcla homogénea llamada crudo.
- **Producción de Clinker:** Es la etapa donde se calcina el crudo a una temperatura de 1400 C, y se convierte en Clinker.
- **Molienda de cemento:** El nuevo Clinker es molido en dos etapas diferentes, después se le adiciona el yeso (con el fin de alargar el tiempo de fraguado), y así se convierte en cemento.

4.4.1 Definición

Según Labahn (1985), el cemento aglomerante hidráulico, es un material inorgánico, no metálico, compuesto de cal, aluminio, hierro y sílice, finalmente molido. Mezclado con agua forma una pasta de fragua y endurece, manteniendo su resistencia y estabilidad incluso dentro

del agua. Las sustancias componentes del cemento reaccionan con el agua de la mezcla, formando silicatos de calcio hidratados.

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la pulverización del Clinker, frío, a un grado de finura determinado, al cual se le adiciona sulfato de calcio natural, o agua y sulfato de calcio natural. A criterio del productor pueden incorporarse, como auxiliares a la molienda o para impartir determinadas propiedades al cemento, otros materiales en proporción tal, que no sean nocivos para el comportamiento posterior del producto.

El Clinker es el material sintético singular, resultante de la cocción a una temperatura de 1400° C, de materias primas de naturaleza calcárea y arcilla ferruginosa, previamente triturada, proporcionadas, mezcladas, pulverizadas y homogeneizadas, Esencialmente el Clinker está constituido por silicatos, aluminatos y aluminoferritos de calcio.

4.4.2 Propiedades del cemento

Según la clasificación establecida por Cemex México (2017), un cemento se caracteriza por las propiedades de resistencia, consistencia y durabilidad, que, en conjunto con el tiempo de fraguado, que se transmitirán al concreto o mortero fabricado con este.

Resistencia a compresión: es la propiedad que resulta más obvia en cuanto a los requisitos para sus usos estructurales. Es importante tener en cuenta las causas que puedan provocar pérdidas de resistencia de este material: envejecimiento, humedecimiento, incorrecto almacenamiento. La resistencia se expresa en términos de resistencia a la compresión según ensayo físico normalizado (de acuerdo a la región) para mezclas normalizadas de cemento y

arena, fraguadas y endurecidas en los períodos que establezca la norma correspondiente y que son generalmente un juego de éstas: 1, 2, 3, 7, 28 y 90 días (Cemex México, 2017).

Consistencia: Es la fluidez que adquiere el cemento con el incremento de agua, se expresa como demanda de agua, en porcentaje respecto al cemento que se añade al mortero, teniendo relación directa con la calidad del cemento y el tiempo de fraguado (Labahn, 1985).

Durabilidad: se expresa por un conjunto de exigencias: de expansión, ensayada por un método físico (aguja o autoclave) o de niveles de los elementos que pueden intervenir en fenómenos expansivos-destructivos como son: cloruros, sulfatos, cal o magnesia libres y álcalis (Cemex México, 2017. p. 3).

4.4.3 Cemento Portland

Según Labahn, 1985, define el cemento Portland como “un grupo de materiales que tienen la propiedad de endurecerse, como roca, poco tiempo después de ser mezclados con agua. Cuando el cemento Portland se mezcla con arena y piedra triturada resulta el material llamado concreto, mucho más resistente que el cemento Portland. Es por tanto el cemento resultante de la mezcla íntima de arcillas y calizas, cocción de la mezcla y molienda del Clinker, añadiéndole finalmente regulador de fraguado que retarda el proceso de endurecimiento.

El cemento Portland consisten en mezclas de silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) y silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), con pequeñas cantidades de compuestos de magnesio y hierro, y el regulador del fraguado. Este cemento es un agente aglutinante hidráulico con una composición por peso de no menos de 95% de Clinker y de cero a cinco por ciento de un componente menor, generalmente sulfato de calcio (yeso); se admite la

adición eventual de otros productos siempre que no excedan el 1% en peso total. Puede fraguar y endurecer bajo el agua y al mezclarse con agregados y agua produce concretos o morteros (Labahn, 1985).

4.4.4 Clasificación del cemento Portland

Las clases más comunes de cemento, según Cañón (2008), son 5 tipos, las cuales sus propiedades y características varían según su porcentaje de dosificación que se aplique de cada materia prima.

- Cemento Portland tipo 1: el cuál es el más comercializado en nuestro país, se conoce como cemento gris y es usado principalmente en estructuras y obras.
- Cemento Portland tipo 1 especial (o modificado): Es considerado un cemento más resistente que el tipo 1, es utilizado generalmente por empresas constructoras.
- Cemento Portland tipo 2: Es un cemento usado generalmente donde hay presencia de sulfatos (ej. zonas cercanas al mar).
- Cemento Portland tipo 3: Es usado generalmente en prefabricados, y donde se requiere un rápido endurecimiento y buena resistencia.
- Cemento Portland tipo 4: se usa para estructuras grandes como presas de concreto, contiene aceptable resistencia a los sulfatos y a la humedad.
- Cemento Portland tipo 5: Contiene una altísima resistencia a los sulfatos, es esencial para las construcciones que tienen constante contacto con el agua de mar.

4.4.5 Materias primas para la fabricación del cemento

Según Cemex México (2017), para la fabricación de cemento se pueden utilizar tanto rocas o minerales de origen natural, como productos o subproductos industriales. El Clinker del cemento Portland está formado por más de 70% de silicatos de calcio, siendo el restante aluminatos y ferro-aluminatos de calcio. Los elementos principales del Clinker: calcio, silicio, aluminio y hierro. Hay tres posibilidades para producir una mezcla de harina cruda:

- Piedra natural del cemento, se define como la roca que contiene los elementos principales del cemento con la proporción adecuada, homogénea, abundante y fácil de explotar.
- Mezcla de los elementos en la proporción adecuada con la mayor pureza posible. Siendo una forma de producción costosa, debido a los altos costos de los materiales puros en la industria.
- Finalmente, la mezcla de diferentes materiales no puros con el elemento a aportar es la manera más utilizada de producir un crudo

Para determinar las rocas potencialmente adecuadas para la elaboración del Clinker, se recurre a los estudios químicos para analizar las concentraciones de los elementos, los elementos secundarios como el magnesio, azufre, álcalis, cloro, y mineralógicos para determinar aspectos texturales de la roca como la dureza y tamaño de grano, siendo factores relevantes en el diseño de la mezcla de la harina, y que también repercuten en la quemabilidad y la molturabilidad de la mezcla. Generalmente, la mezcla cruda se prepara con las materias primas principales, que consisten de un componente calcáreo, un componente arcilloso y el aditivo.

4.4.5.1 Componente calcáreo

La caliza es el componente calcáreo de mayor importancia en la industria del cemento. Esta roca es de tipo sedimentaria compuesta principalmente por calcita, y por lo tanto presenta un alto contenido de carbonato de calcio, que puede llegar a ser de más del 95 %. Existen otros materiales calcáreos que son algunas veces utilizados para la fabricación de cemento, aunque también contienen al carbonato de calcio como componente esencial, por su origen, no son muy comunes y algunos de ellos pueden presentar características físicas o químicas no deseables.

Tabla 2.

Proporción de CaCO₃ y arcilla (incorporada junto con el carbonato de calcio) que guarden las rocas.

Uso	Roca	% CaCO ₃	CaO
Como Caliza	Caliza de alto grado	>95	> 53,2
	Caliza	85-95	47,6 - 53,2
	Caliza Margosa	75-85	42,0 - 47,5
	Marga Caliza	60-75	33,6 - 42,1
Como Arcilla	Marga	40-60	22,4 - 33,5
	Marga Arcillosa	25-40	14,0 - 22,3
	Arcillosa Margosa	10-25	5,6 - 14,1
	Arcilla o Lutita	< 10	< 5,6

Nota: Tomada y modificada de Cemex México, 2017.

4.4.5.2 Componente Silico-aluminoso

Cualquier material natural en cuya composición química son comunes los óxidos de sílice y aluminio pueden formar parte de este componente. Los materiales que pueden utilizarse como el componente silícico-aluminoso en el proceso del cemento son los sedimentarios, como las arcillas o lutitas, margas, depósitos aluviales o eólicos y suelos residuales; también pueden utilizarse rocas ígneas como lo son los depósitos de ceniza volcánica y rocas de composición básica o intermedia, que se presenten intemperizadas y sean de fácil extracción y trituración. Algunas rocas metamórficas como la pizarra, la filita y el esquisto, por su composición química pudieran ser utilizadas, aunque con cierta reserva. El caolín cuando es muy puro se utiliza como el componente silico-aluminoso en la producción de cemento blanco.

Las arcillas pueden contener cantidades apreciables de otros compuestos como cuarzo, calcita, yeso, limolita, pirita (con contenido de azufre) o feldespato. Por lo general, son relativamente insolubles y suelen contener proporciones altas de álcalis; son relativamente blandas y reactivas por lo que su quemabilidad y molturabilidad son buenas, siempre y cuando la sílice no se encuentre presente en forma de cuarzo, debido a que, el cuarzo es un cristal muy duro y difícil de reaccionar, por esta razón, requiere de una gran cantidad de energía para desestabilizar su estructura.

4.4.5.3 Adiciones

Los materiales adicionados más utilizados son el yeso (se encuentra con mayor detalle en el siguiente capítulo, Conceptos sobre el yeso) y las puzolanas. Las puzolanas son de origen volcánico como las tobas o cenizas volcánicas, de composición generalmente vítrea por su

carácter extrusivo, que tienden a ser reactivas con la cal libre del cemento generando propiedades hidráulicas que son beneficiosas para las resistencias de los cementos. Así mismo los basaltos porosos que contienen zeolitas (minerales altamente reactivos como adición de cemento) son excelentes puzolanas. En la selección de las puzolanas debe considerarse su actividad, molturabilidad, la ausencia de arcilla (compuesto no deseable), ya que estas últimas ocasionan un consumo mayor de agua en el concreto, y el contenido de conglomerados de rocas inertes que no generan aportación a las resistencias del cemento. También se pueden utilizar materiales inertes como adiciones, como las calizas, o la calcita en el cemento blanco para aumentar el grado de blancura, aunque no aportan resistencia.

4.5 Conceptos básicos del yeso

El yeso, sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), se muele junto con el Clinker en proporciones que oscilan entre el 3% y 5% para que actúe como un retardante del fraguado. Se reconoce, además, su incidencia en la formación de la etringita y el monosulfato durante el proceso de hidratación del cemento. Algunos investigadores también han experimentado con él como mineralizador y clinkerizador, con resultados muy aceptables (Tobón *et al.*, 2006. p. 58).

El yeso es una adición esencial en la fabricación del cemento, debido a que tiene la propiedad de regular el fraguado de las rocas y su origen proviene de las rocas sedimentarias que se denominan evaporitas (depósitos generados por la evaporación del agua). Formada principalmente por sulfato de calcio di-hidratado, utilizándose aquel que tenga el mayor contenido de este compuesto y la menor proporción de residuo insoluble. La variedad del sulfato de calcio sin moléculas de agua es la Anhidrita, siempre encontrándose con el yeso en los

yacimientos, pero su uso no es recomendable debido a que genera falso fraguado. Generalmente el yeso normalmente se asocia con calizas, sales, dolomitas y arcillas, debido a su ambiente de formación, representando impurezas de los depósitos de este mineral (Cemex, 2017).

4.5.1 Mineralogía

Según Sanz (2009), existen tres fases de sulfato de calcio en la naturaleza, dos fases hidratada: yeso y basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$), y una sin moléculas de agua que es la anhidrita (CaSO_4), se relacionan entre sí por fenómenos geológicos de diagénesis (transformaciones durante la compactación de los sedimentos) e hipergénesis (transformaciones y alteraciones tras la exhumación de las rocas), apareciendo en extensas masas de gran espesor, asociadas a calizas, dolomías y arcillas, en depósitos evaporíticos. Químicamente el yeso muestra muy poca variación en su composición.

El yeso como mineral se presenta generalmente en color blanco o transparente, con algunas variaciones grises, amarillentas, verdes, rojas o pardas, estando relacionándose con la presencia de impurezas, en especial hierro, del que toma el color según su estado de oxidación. Otras propiedades son su baja dureza superficial ($H=2$, en la escala Mohs), su bajo peso específico, $2,32 \text{ g/cm}^3$ y su exfoliabilidad.

Sobre el aspecto externo, se resalta la gran variedad del estado natural del yeso en su morfología o textura cristalina. Desde megacristales y completamente transparentes (variedad selenita) que frecuentemente se encuentran maclados (en punta de lanza, o cola de golondrina), hasta agregados fibrosos, fibrolaminares granulares que dan lugar a yesos masivos.

El yeso cristaliza en el sistema monoclinico en el grupo espacial $20 I 1 2/a 1$, con $a = 5,674 \text{ \AA}$; $b = 15,105 \text{ \AA}$; $c = 6,491 \text{ \AA}$; $Z = 4$; $\alpha = 90, 0^\circ$; $\beta = 118, 5^\circ$; $\gamma = 90, 0^\circ$ como parámetros de red. La estructura del yeso se compone por tetraedros de sulfato de calcio con poliedros de calcio rodeados por cuatro oxígenos, formando cadenas paralelas al eje c . Estas cadenas se disponen paralelas unas a otras formando láminas unidas unas a otras mediante puentes de hidrógeno, lo cual explica la excelente exfoliación según $\{010\}$ del yeso.

4.5.2 Química del yeso

Químicamente el yeso muestra muy poca variación en su composición. Para Guillén (2005), el mineral yeso es una sal compuesta, sulfato cálcico dihidratado, el sulfato cálcico se presenta en la naturaleza como anhidrita, es decir sin agua en la combinación. Ambos se consideran parte del grupo de las rocas evaporitas, siendo el yeso su forma hidratada.

Según Sanz (2009), escribe sobre la disposición del agua, que “mediante la espectroscopia vibracional de infrarrojo que la molécula de agua tiende a separarse de modo que el hidrógeno se asocia con los oxígenos del grupo sulfato, formando unas moléculas virtuales de agua, y el oxígeno se acerca al calcio”. De la misma manera, Sanz (2009, p. 46), expresa que, “esta asociación estabiliza al ion calcio, de modo que resulta muy difícil que se pueda sustituir por otro catión, a esta propiedad del yeso se llama conservatividad”.

Se confirma también la afinidad del agua por el catión y otra parte por el anión, debido a su polaridad, se realiza un reparto global del agua de modo que la mayor parte (1,5 moléculas) se asocia al catión, quedando el resto (0,5 moléculas) como agua aniónica, enlazándose por puentes de hidrógeno al sulfato.

4.5.3 Ambiente de formación

Fundamentalmente el yeso se deposita en dos tipos de ambiente: Marino, en llanuras costeras evaporíticas, o continental, en lagos salinos. Todas las sales están formadas por la evaporación de una salmuera. La fuente fundamental de tales salmueras es el agua de mar. El depósito puede formarse por evaporación de un brazo parcial o totalmente aislado del mar en una región árida (evaporitas marinas). La concentración de sales en el agua de mar es bastante estable, y da lugar a la siguiente serie de deposición: carbonato cálcico – sulfato cálcico - cloruro sódico – sulfato de sodio y magnesio - bromuro sódico cloruro potásico.

En los años 60, en el Golfo Pérsico, se han estudiado las llanuras costeras evaporíticas (sabkhas), para mejorar la comprensión de la sedimentación del sulfato de calcio. También se ha observado en el Mar Mediterráneo (Túnez y Egipto) y en Texas (USA) y México. En estas regiones, con intensa evaporación de agua de mar, el yeso y/o la anhidrita precipitan dando lugar a depósitos potentes de sulfato cálcico nodular o laminado. En este tipo de ambiente los cristales pueden crecer a partir del fondo de las lagunas hacia arriba o bien formarse en la superficie de la salmuera y caer posteriormente por gravedad hacia el fondo donde se acumulan (Sanz, 2009).

El yeso y anhidrita sufren transformaciones geológicas desde su depósito original, siendo minerales relativamente inestables y son susceptibles, afectando su composición y su textura. El yeso enterrado se transforma en anhidrita y la anhidrita exhumada se convierte en yeso con aumento de volumen. Toda la serie de cambios y transformaciones geológicas que sufre el yeso se conocen como ciclo geológico del sulfato cálcico. En condiciones normales, el yeso es la fase estable a temperatura ambiente, de modo que es la que va a formarse, en ese caso se habla de

yeso primario de precipitación libre (yeso primario sensu stricto). En el caso de que la cuenca esté sobresaturada en sal, puede precipitar anhidrita (anhidrita de precipitación libre), (Fig.10). El yeso además puede precipitar entre los sedimentos de borde de cuenca, al albergar éstos agua salobre que se puede evaporar. En este caso se habla de yeso primario intersticial.

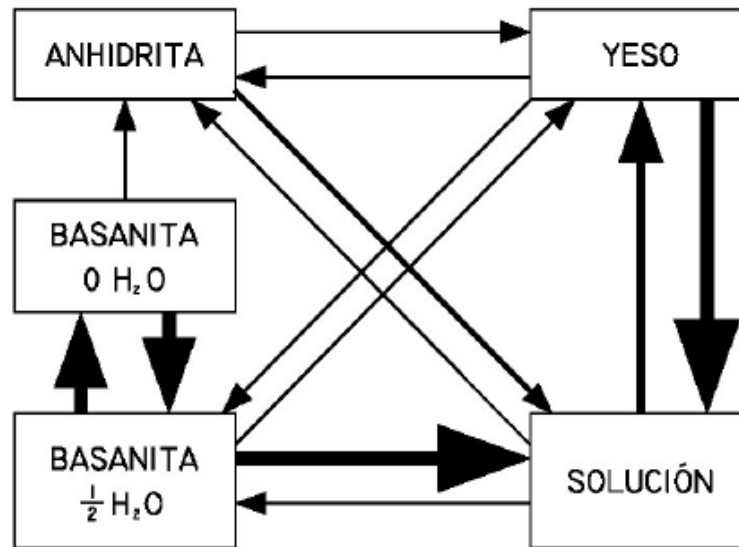


Figura 10. Ciclo geológico de los sulfatos de calcio naturales. Tomado de Sanz, 2009.

4.5.4 Yeso en Colombia

Desde 1948, según Sigenwald (1949), en Colombia se han reportado diferentes distritos productivos de yeso de importancia son, en Girardot al suroeste del departamento de Cundinamarca, en Villa de Leiva en el centro-oeste del departamento de Boyacá, Los Santos en el centro- este del departamento de Santander, Rovira en el centro del departamento de Tolima y en dispersas localidades al sur de Tolima y norte de Huila.

En Girardot se ha encontrado un cinturón a lo largo del departamento de Cundinamarca hasta el municipio de Tocaima, con un clima semiárido. El yeso se presenta como unos filones y

también como vetas oblicuas a la base de shale gris-rojizo de la Formación Barzalosa. Todas las minas en la parte suroeste del distrito pueden estar en la misma capa de shale, que mide de 1 metro a 3,5 metros de espesor.

En Boyacá, el yeso está irregularmente en un área de unos 5 por 20 kilómetros que se extiende hacia el sur desde el municipio de Villa de Leiva, con un clima semi árido, restringido a pequeñas y desconectadas áreas, presentándose a lo largo de fracturas y entre las láminas de yeso blancuzco con alto buzamiento. Hacia la parte de Las Juntas en el mismo departamento, donde el clima ya no es árido, también se han reportado venas en capas de shales.

En Santander, el yeso está distribuido irregularmente entre un área cuadrangular de 40 por 60 kilómetros, que se extiende hacia el oeste desde un punto a 5 kilómetros al oeste del municipio de Los Santos, donde el clima es semi árido. Cruz y Vargas (1972), mencionan tres variedades de yeso en la Mesa de Los Santos que son selenita (asociada a las arcillas de la Formación Paja), yeso fibroso y yeso masivo. Asimismo, añaden, que el nivel yesífero de interés económico, se presenta hacia la base de la Formación Rosablanca con un espesor promedio de 12 m., aproximadamente 20 m. También observaron una serie de bancos masivos lenticulares de yeso gris, de espesores variables, que van de 16 cm a 2,10 m con intercalaciones menores de lutitas grises, calcáreas, yesíferas, algunas con lutitas grises arenosas y calizas dolomíticas azulosas de grano fino (Cruz y Vargas, 1972. p.5).

Sigenwald (1948), también hace referencia, que, en el centro del departamento de Tolima, en el municipio de Rovira, se presenció yeso en forma de lentes en capas de shales vari coloreados. El lente de mayor grosor tiene una anchura máxima de 1,5 metros donde está expuesto. Otros depósitos pueden ser ocultados por el suelo. En el mismo departamento, pero hacia sur, en el semiárido del valle del río Magdalena, presentándose yeso como filos y venas, en lentes de shale.

4.5.5 Yeso en el cemento

Según Labahn (1985), el yeso es un aditivo regulador del fraguado, proceso que retarda el endurecimiento del cemento. Asimismo, para Cañón (2008), la función primordial de yeso es controlar el tiempo de fraguado, siendo un factor importante para la calidad final del cemento.

El SO₃ es el parámetro químico que determina la calidad del cemento, conteniendo un doble efecto en la producción de cemento, empezando porque constituye una dilución de Clinker, regulando proporcionalmente las resistencias, y el otro efecto del SO₃ es el incremento las resistencias. De acuerdo a esto, para la explotación de yesos, se buscan los más ricos posibles y carentes de materiales arcillosos. La búsqueda, por lo tanto, del nivel de SO₃ óptimo se hace necesario a efectos resistentes, sabiendo que ése óptimo será distinto para cada edad por lo que habrá de elegirse a qué edad considerar (Cemex, 2017). En el caso de los cementos Portland, cada Clinker requiere un contenido "óptimo" de retardador -yeso dihidrato, anhidrita o mezcla de ambos- para dar lugar a un cemento "correctamente retardado" y de mejores características mecánicas, de estabilidad de volumen y de durabilidad.

4.5.6 Criterios sobre la explotabilidad de un yacimiento de yeso

Para garantizar la explotación del yeso deberá responder, se basó en los criterios expuestos por Cerulla (1997), para que la explotación sea económicamente viable, de forma segura y que genere buenos beneficios. Estos criterios se cumplen atendiendo a estas determinadas condiciones:

- **Calidad:** La explotación debe tener un mínimo % de sulfato cálcico para la fabricación del producto final deseado.
- **Cantidad:** En función de las toneladas que se extraigan del yacimiento, se justifica las inversiones en la cantera y en la fábrica donde se producirán materiales a base de mineral de yeso.
- **Estructura geológica del yacimiento:** determina reservas explotables. Entre más pequeña es la cobertura estéril abarata los costos de producción y los índices de recuperación de explotación. El factor estructural del yacimiento, tales como fallas o pliegues, genera problemas en la explotación, como resultado puede interrumpir la continuidad de los mantos en los frentes de avance, originando problemas de producción, seguridad y homogeneidad en la calidad. Una zona localizada en una complejidad estructural no es interesante económicamente.
- **Características de la capa:** El potencial de la capa que se explotará debe ser lo suficientemente importante, porque el área de explotación total se deberá adquirir cuanto más potente sea ésta. La capa debe ser lo más continua posible. Las capas discontinuas con zonas estériles son difíciles y peligrosas de explotar.
- **Presencia de agua:** se debe reconocer bien el comportamiento de las aguas dentro del yacimiento, ya que puede generar peligros y perjuicios a la cantera. Tomando medidas en los niveles de agua, identificar los planos de falla donde pueden haber llegadas de aguas e identificar presencia de acuíferos.
- **Estabilidad de los taludes:** Factor fundamental en la explotación a cielo abierto en los aspectos de rentabilidad y seguridad.

- Otros criterios: El yeso como mineral barato debe tener en cuenta las anteriores características para iniciar la apertura de un nuevo yacimiento o continuar su operación, de igual forma atender a las necesidades de tener una buena accesibilidad a las grandes redes de transporte, cercano a la fábrica de yeso y facilitar la explotación del yacimiento sin necesidad de máquinas especiales o de efectivos importantes de personal que aumenten el costo de la operación. Uno de los nuevos criterios, se deriva en la creciente presión ejercida sobre las sociedades explotadoras para que reduzcan o minimicen el impacto ambiental causado por las explotaciones.

4.5.7 Mina La Nacuma

Ubicada en el municipio de Los Santos departamento de Santander, 62 Km, al sur de Bucaramanga, al oriente del casco urbano de Los Santos. Se encuentra en la región del Cañón del Chicamocha, esta área es labrada por los ríos Chicamocha y Sogamoso. Las concentraciones principales están en los afloramientos de yeso en la base de la Formación Rosablanca, con una reserva aproximada de 650.000 toneladas para una vida útil de 21 años (Livia *et al.*, 2007. p. 862). Según Cuello y Pineda (2010), existen dos tipos de yacimientos yesíferos; uno estratificado asociado rocas calcáreas en la base de la Formación Rosablanca y el otro tipo de yeso es residual y consiste en concentraciones de yeso granular y laminar a lo largo de fracturas y en los niveles superiores de meteorización de la superficie.

El de la mina de La Nacuma, es un yacimiento de yeso de origen evaporítico, formado por diferentes procesos relacionados a eventos sedimentarios, en estudios previos relacionados a la zona de trabajo, Ward & Goldsmith (1970) afirmaron, que el yeso se presenta filos y vetas de yeso, en mayoría menores a un centímetro de espesor, siendo su roca minada, unas capas de shales de color gris a gris oscuro debido a las arcillas y al material carbonatado. También

mencionaron, que el buzamiento regional es suave entre 4° a 12° y que sus características estructurales son algunas fallas normales con poco desplazamiento. El miembro yesífero de la Formación Rosablanca tiene de espesor 12 metros en promedio y su base está 20 metros encima del contacto entre las Formaciones Rosablanca y Los Santos.

5. Metodología

La metodología que se ha desarrollado en el proyecto fue dividida en dos etapas, con el fin de lograr los objetivos propuestos.

5.1 Metodología de campo

El trabajo de campo se basó en torno a tres fases que permitieron la obtención de los datos para el desarrollo del proyecto:

5.1.1 Cartografía superficial

La cartografía superficial estuvo dividida en 3 etapas, la primera comprendió en un reconocimiento de la zona para establecer las rutas para las estaciones de trabajo, observar aspectos a nivel regional, como estructuras geológicas, cuerpos de agua y las pendientes con respecto a las curvas de nivel, la segunda son las estaciones donde se describieron los afloramientos de los cuerpos rocosos que están expuestos en la zona. La tercera etapa consiste en la ubicación de las estaciones en el mapa por medio de sus coordenadas para empezar a establecer contactos de las unidades litológicas en campo.

Etapa 1: Reconocimiento de la zona. Previamente antes de iniciar con el recorrido de campo, se identificaron los caminos donde realizarían las estaciones en el mapa topográfico (Fig. 12), como también drenajes, ríos y las curvas de nivel para analizar las pendientes de la zona. El siguiente paso del reconocimiento de campo fue realizar el recorrido de toda la zona para rectificar los aspectos que se identificaron dentro del mapa en la zona de campo, estableciendo las rutas para la realización de las estaciones de descripción geológica y se tomaron fotos de las panorámicas para distinguir estructuras regionales (Fig. 11).



Figura 11. Panorámica de la zona de campo, tomado en el reconocimiento de campo, donde se observa el estilo de pendiente escarpado, que predomina en la zona de trabajo. Vista al oeste.

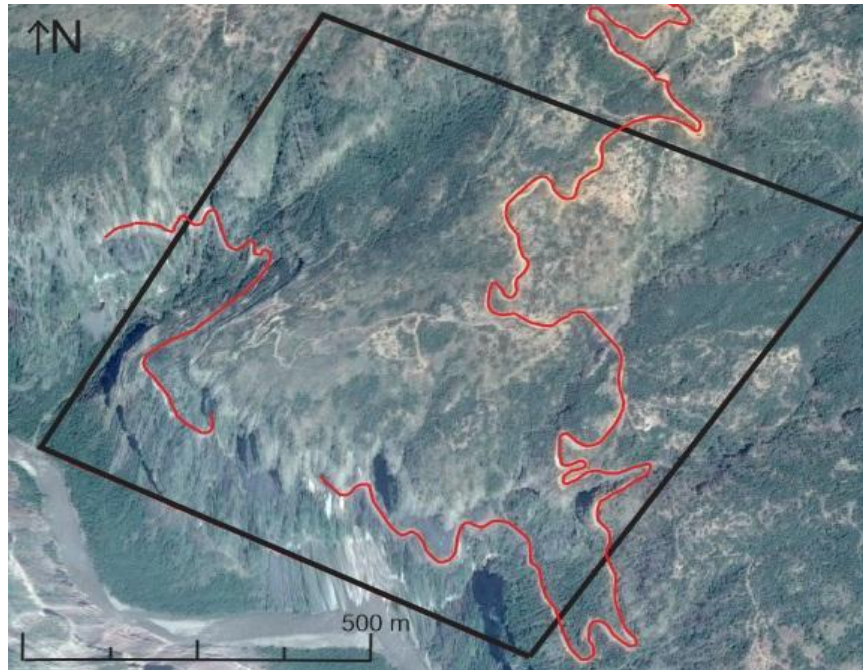


Figura 12. Trayecto definido para recorrer y reportar las estaciones de los afloramientos para la cartografía de la zona de campo (Línea roja). Tomado y modificado de Google Earth Pro 2017.

Etapa 2: Descripción de las estaciones en los afloramientos. Para la observación y descripción de la litología que aflora en la zona de campo y las estructuras geológicas que afectan en área de trabajo, se realizaron las estaciones en los afloramientos en base al trayecto trazado en el reconocimiento de campo hecho en la zona de trabajo (Fig.13). Debido que solo se trabajó una sola ruta por la escasez de estas y la pendiente de escarpada a ladera alta en la zona, se determinó como parámetro hacer las estaciones cada vez que se observaran cambios geológicos en la carretera, entre estos se destacan, el cambio de litología o presencia de estructuras geológicas locales, como fallas. Para controlar litología que se encontró en las estaciones, se tomaron puntos de control, facilitando la cartografía dentro del mapa de trabajo.



Figura 13. Estación MNC_01_01 donde se observan una intercalación de margas negras con alto contenido de fósiles con unas calizas wackestone negras. Vista al Este.

Para la descripción de las estaciones de la cartografía geológica se realizó un esquema de una planilla de campo para las estaciones (Fig. 14 y Fig. 15), en el cual se diera las descripciones de los aspectos más relevantes que se pudieran observar en los afloramientos de cuerpo rocoso, tales como la localización geográfica, la geomorfología, la litología y los datos estructurales tales como la estratificación, estrías de fallas, etc. Dentro de las estaciones también se realizaron esquemas dibujados para el mejor entendimiento de la disposición de los cuerpos rocosos y las estructuras, estas se apoyan con fotos del afloramiento para un mejor análisis del afloramiento (Fig. 13).




		Planilla de Campo Mina Nacuma					
Fecha		Estación					
Geólogo							
Dibujos y Esquemas de la Estación							

Figura 15. Página 2 de la Planilla de campo (CEMEX) que se empleó para la descripción de las estaciones. En esta parte de la planilla permite dibujar esquemas que permitan entender mejor la disposición del afloramiento.

Etapa 3: Ubicación de las estaciones en el mapa de trabajo y trazo de contactos de las unidades litoestratigráficas definidas. Se efectuó esta etapa de acuerdo a estaciones realizadas en los afloramientos rocosos de la zona de campo. En estas estaciones fueron tomadas coordenadas con el GPS para su debida ubicación en el mapa de topográfico. A partir de la litología encontrada en campo, se definen las unidades que se quieren mostrar dentro del mapa geológico,

teniendo en cuenta la literatura publicada sobre estas unidades litoestratigráficas. En el proyecto, la unidad litoestratigráfica de interés, es la Formación Rosablanca, por tal motivo se realizó una cartografía más detallada a esta unidad, determinando que el mapa se enfocaría a la identificación de los miembros de Rosablanca que se observaron en los afloramientos de la zona de estudio. En el caso de la Formación Los Santos que es la unidad litoestratigráfica que infrayace a la Formación Rosablanca, fue inferida en el mapa geológico debido a que estas unidades estaban dispuestas en las zonas más escarpadas y de difícil acceso. Los contactos cartografiados de los miembros de la Formación Rosablanca, fueron definidos mediante la fórmula de espesores (Ec. 1), la cual se puede hallar el tope y la base, por medio del buzamiento y la distancia entre curvas de nivel del mapa topográfico.

$$X = \frac{CN}{\tan(\beta)} \quad [1]$$

5.1.2 Estratigrafía superficial

Con respecto a la cartografía superficial, se determinó como estaba dispuesta la unidad litoestratigráfica de interés en la zona de campo y se definió aplicar el método de Jacob ó bastoneo para el levantamiento de la columna estratigráfica detallada. Esta fase de la metodología de campo fue dividida en dos etapas:

Etapa 1: Relación estratigráfica y topográfica de la unidad litoestratigráfica. Con la cartografía geológica de superficie hecha, se analizó la disposición de la unidad litoestratigráfica (Formación Rosablanca) en la zona de campo para realizar el levantamiento de la columna estratigráfica, esto se definió de acuerdo la relación de las curvas de nivel (topografía) y el nivel estratigráfico de la unidad (uso de las reglas de las V). Con base a esta relación, se establece el

trayecto adecuado, ya sea en una carretera o en un drenaje, donde aflore gran parte de la sección estratigráfica que se quiere detallar.

Etapa 2: Levantamiento de la columna estratigráfica por medio del método de Jacob o de Bastón. El levantamiento de la columna estratigráfica se ejecutó en tres secciones que comprendiera la mayor parte de la Formación Rosablanca que aflora en la zona (Fig. 16), debido a que una parte de esta unidad se encuentra cubierta por unos depósitos aluviales. La sección 1, se encuentra cercana al contacto con el basamento Jurásico-Cretácico, por lo tanto, se localiza hacia la base de la Formación Rosablanca. En la sección 2, se levantó la mayor cantidad de espesor de esta formación, un total de 119,5 m y la sección 3, levantada en el contacto entre la Formación Rosablanca y la Formación Paja.

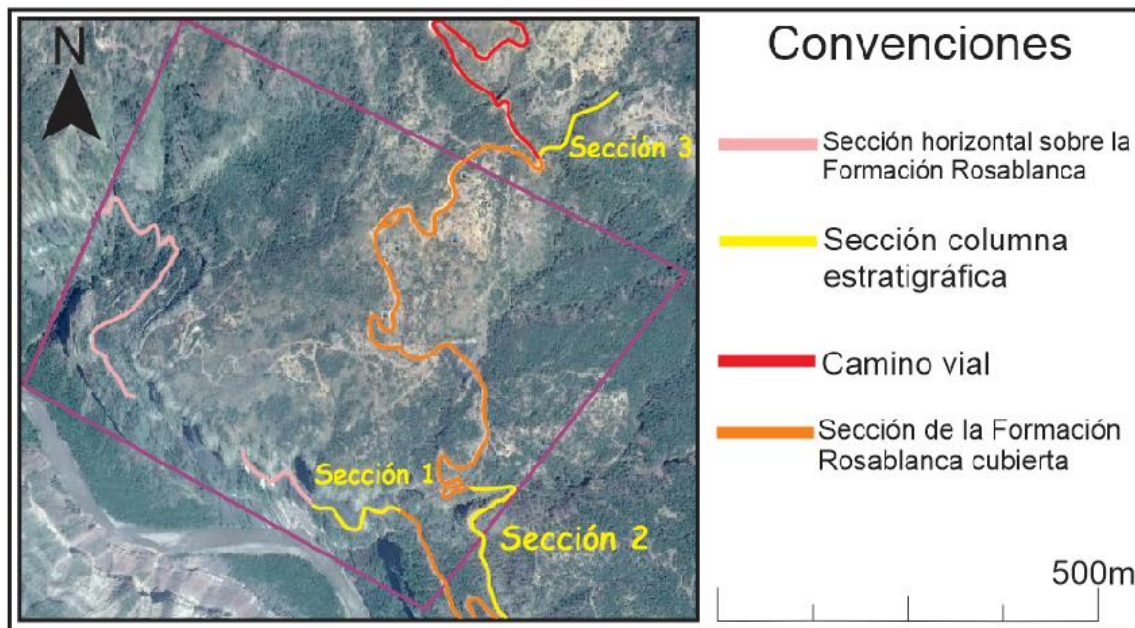


Figura 16. Tramo de las secciones de levantamiento de la columna estratigráfica en la zona de trabajo. Las líneas de los tramos de color naranja corresponde a la sección de la Formación Rosablanca que está cubierta por un depósito aluvial y los tramos con la línea de color rosado es la sección horizontalizada de la Formación Rosablanca donde no fue posible levantar una columna estratigráfica. Tomado de Google Earth Pro 2017.

El método de Jacob o del Bastón, fue el utilizado para este levantamiento, el cual facilitó medir los grandes espesores de estratos en sus dimensiones reales y es un método muy práctico para en campo. Este método consiste en posicionar el bastón de Jacob de 1,5 m perpendicular al plano de estratificación, inclinando este con la brújula hacia el mismo ángulo de buzamiento de la estratificación (Fig. 17), para mostrar la disposición real de los espesores de los estratos y describir la litología que corta el bastón en el esquema de la columna detallada. El bastoneo se realiza a lo largo del trayecto de la sección definida para el levantamiento de la columna, empezando desde la parte inferior hasta la parte superior, con respecto a la base y el tope de la unidad lito-estratigráfica de interés.



Figura 17. Ilustración del método de bastón de Jacob en campo. Se muestra cómo se orienta el bastón con respecto a la inclinación de los estratos, para describirlos litológicamente en su disposición real. Vista al Noreste.

5.1.3 Muestreo del miembro yesífero dentro de las minas para los análisis de laboratorio

Para la elaboración del modelo geológico tridimensional, se definieron tres variables para la toma de datos en la mina, la primera variable es la química de las capas del miembro yesífero en explotación, tanto en los túneles como en los frentes, la segunda variable los espesores de cada capa del miembro en interés con su respectiva litología y la tercera es la localización geográfica de los puntos donde se tomaron los anteriores datos, por medio de sus coordenadas. Para llevar a cabo la toma de estos datos, el trabajo se dividió en 3 etapas:

Etapas 1: Identificación de los mantos productores y los estériles en la mina. Esta etapa fue el punto de partida, para la obtención de los datos a modelar. Previamente, se consultó fuentes de información de la compañía para conocer el yacimiento yesífero, debido a que los niveles de interés ya fueron definidos para su explotación. Con respecto a esta información se prosiguió a la identificación de estos mantos en la bocamina y dentro de la mina.

Los niveles de los yesos fueron llamados informalmente, de techo a base, Pizarra, Churca, Lajeo, Chaqueta, La Dura, Cuero de sapo y Galleta. En la mina La Nacuma los principales tres niveles de yesos que están en explotación son el nivel de Churca, Lajeo y Chaqueta, siendo la Pizarra el techo y La Dura el piso de la mina. Los niveles donde se tomaron las muestras fueron los que están en avance de explotación que son Churca, Lajeo y Chaqueta (Fig. 18 y Fig. 19).



Figura 18. Ilustración de los tres principales niveles de explotación de yeso en el túnel 8 dentro de la mina de la mina La Nacuma. Vista al Noroeste.



Figura 19. Niveles productores señalizados en la bocamina de Nacuma. La visibilidad de la luz del día permitió a identificar la disposición de las capas. Vista al Norte.

Etapa 2: Toma de muestras de los niveles de yesos y levantamiento de la columna estratigráfica en los frentes de avance de la mina. Hacia los frentes de avance de la mina, se realizó la toma de cada capa de los niveles yesífero y el levantamiento de la columna. En el muestreo según el estado del frente y su disposición, se utilizaron los métodos de canal y chip (esquirlas), tomando los fragmentos y las partículas lo más frescas de la roca (Fig 20 y Fig 21). En los frentes se tomaron muestras de los mantos y de los estériles, obteniendo la medida de los espesores y la clasificación litológica de estos, para la elaboración de la columna estratigráfica.

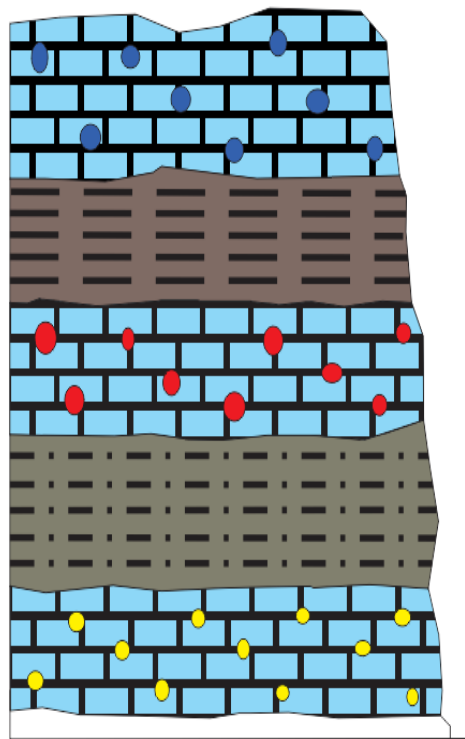


Figura 20. Representación teórica del método de chip para la toma de muestras de partículas para el análisis de laboratorio. El muestreo se realiza de modo disperso, como se ilustra en los puntos de color en cada capa, obteniendo una muestra representativa de la capa de interés.

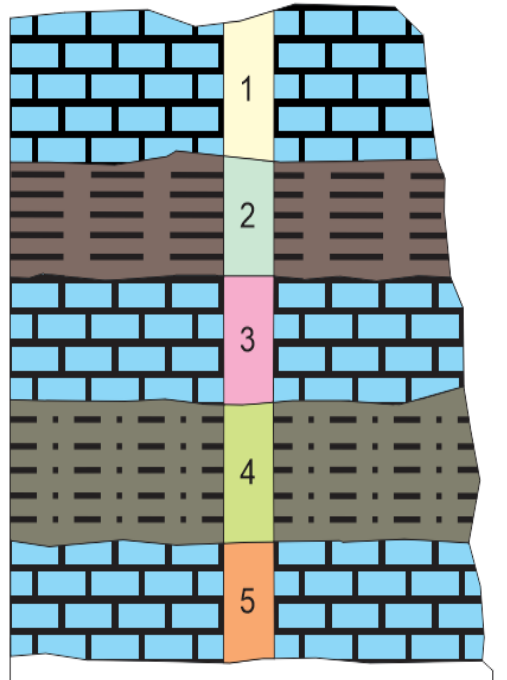


Figura 21. Representación teórica del método de chip para la toma de muestras de partículas para el análisis de laboratorio. El muestreo se realiza de modo disperso, como se ilustra en los puntos de color en cada capa, obteniendo una muestra representativa de la capa de interés.

Las muestras se empacaron en bolsas fuertes de plástico con su respectiva etiqueta de identificación para el análisis en el laboratorio (Fig. 22), el tamaño de las partículas no sobrepasa las 3 pulgadas de longitud, intentando tomarlas lo más pequeñas posible y directamente de la capa rocosa.


MUESTRA:	
GEÓLOGO:	
FRENTE:	NIVEL:
OBSERVACIONES:	
	

Figura 22. Esquema de las etiquetas (CEMEX) para las muestras tomadas para el análisis de laboratorio.



Figura 23. Toma de las muestras en uno de los frentes de avance de la mina Nacuma

Etapa 3: Toma de muestras de los mantos de interés y elaboración de columnas estratigráficas en los pilares de la mina.

En los túneles de la mina se realizaron estaciones cada 50 metros donde se hizo el levantamiento de la columna estratigráfica, midiendo con decímetros los espesores de los estratos y clasificándolos litológicamente, también observando la presencia de estructuras geológicas y sedimentarias. En ciertas estaciones de túneles, se hizo muestreo, pero solamente se recolectaron muestras de los mantos productivos de yeso, marginando a los estériles. La selección de las estaciones que fueron muestreadas en los pilares de los túneles fue producto de la confección de una red interna de estaciones en la mina para que se relacionaran entre sí, ya sea por su localización o se conectaban entre sí por una de las cruzadas de la mina (Fig 24). Esto se realizó para abarcar una densidad considerable de datos para el modelamiento tridimensional.

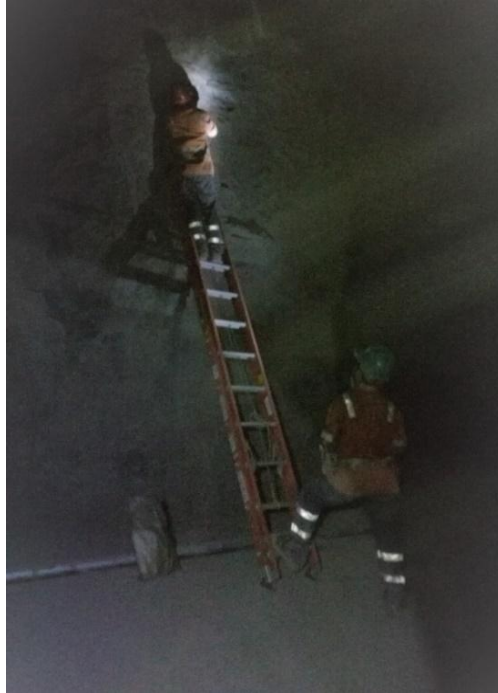


Figura 24. Toma de las muestras en uno de los frentes de avance de la mina Nacuma.

5.2 Metodología de oficina

Para la metodología de oficina se llevaron las siguientes labores que dieron como producto los resultados de este proyecto:

5.2.1 Realización del mapa geológico digital

A medida que se realizó la cartografía superficial en campo, los datos tomados en los afloramientos se fueron representando manualmente en el mapa topográfico, con el objetivo de efectuar una adecuada interpretación de las evidencias geológicas de la zona y así mismo organizar la información en el momento de digitalizar el mapa.

Para la elaboración del mapa topográfico se requirió de una la imagen satelital de zona de interés buscada en Google Earth Pro, con el fin de que fueran importadas desde el programa Global Mapper v.18.0. Por medio de este software, se adquirió el archivo Modelo Digital de Elevación - MDE (ASTER GDEM v2 Worldwide Elevation Data (1 arc-second Resolution)), de donde se han generado las curvas de nivel de las cotas de altura del área de trabajo cada 10 m, creando un formato shapefile para su aprovechamiento en otros programas GIS. Estas curvas de nivel fueron exportadas al programa ArcGIS 10.3.1 en su herramienta ArcMap, para el correspondiente dibujo digital de los aspectos que conformaran el mapa como los datos estructurales (inclinaciones de capas), contactos de las unidades lito-estratigráficas (inferidos, definidos o por imagen satelital), obras civiles (carretera y caseríos), corrientes de agua (río Chicamocha), etc.

5.2.2 Análisis petrográfico en secciones delgadas

Las muestras que se escogieron fueron los mantos productivos de yeso de la mina, para determinar la composición y su textura de la roca a estudiar. Se llevaron las muestras al laboratorio de microscopia secciones delgadas de la universidad, donde se prepararon siguiendo las siguientes etapas:

- Preparación y biselado del portaobjetos de vidrio.
- Corte de la tableta en prismas rectangulares (4x3x1 cm).
- Impregnación al vacío, desbaste, pulido y lavado de la tableta.
- Secado de la tableta en una estufa durante 24 horas.
- Pegar el portaobjetos de vidrio a la tableta.

- Prensado de la tableta adherida al portaobjetos de vidrio.
- Corte y desbaste de la sección hasta el espesor correcto.
- Revisión de los colores de interferencia de los minerales, con el fin de revisar si la sección quedó con el espesor correcto.

Posterior a la preparación de las secciones delgadas, estas fueron observadas y analizadas en un microscopio de luz reflejada Nikon ECLIPSE E200 50/POL, trabajándose con el objetivo de Lente Mediano Poder - 10X y ocular de 10X (Fig 25). Para el análisis de cada sección delgada, primero se recurrió a la identificación de los minerales, a partir de las características ópticas de los minerales, tales como, pleocroísmo, ángulo de extinción, relieve, exfoliación, color de interferencia, hábito, etc., y el tamaño de los granos de la muestra se midieron a partir del micrómetro del ocular y se realizó la conversión con los valores de la tabla.

Tabla 3

Tabla para la determinación de tamaño de grano de partículas y cristales, para los microscopios marca Nikon.

Ocular	Objetivo	Unidades del micrómetro /mm
10X	4X	0,027
10X	10X	0,0095
10X	40X	0,0027

Nota: Tomado y modificado de Cruz y Caballero 2008.

Con base a la identificación de minerales, se procede al conteo de estos, en el cual se barre la sección cada 1 mm de forma vertical y horizontal con ayuda del carro móvil del microscopio.

Con el conteo de minerales y la determinación de los tamaños de granos de la sección se clasifican las secciones de acuerdo a criterios texto-composicionales de Dunham (1962).



Figura 25. Microscopio de luz reflejada NIKON ECLIPSE E200 50/POL empleado para analizar las secciones delgadas. Tomado de la página https://www.nikoninstruments.com/es_AMS/Productos/Microscopios-verticales/Investigacion/Eclipse-E200-POL.

5.2.3 Digitalización de la columna estratigráfica

En la digitalización de las columnas estratigráficas se tomaron como base las secciones levantadas en el trabajo de campo que fueron las siguientes:

- La primera sección en proximidades al límite Jurásico – Cretácico con longitud vertical de 15 metros.
- La segunda sección levantada en proximidades a la mina y con longitud vertical más extensa que todas (119.5 metros).

- La tercera tomada en el contacto entre la Formación Rosa Blanca y la Formación Paja y de longitud vertical de 16.5 metros.

Para la digitalización de estas tres secciones se tuvieron en cuenta los mismos parámetros: longitud vertical, escala, tamaño de grano, calibrado, color de la roca, presencia de fósiles, estructuras sedimentarias físicas, estructuras sedimentarias químicas. Estos parámetros se introdujeron y se dividieron por columnas.

Se contó con la colaboración del software libre estratigráfico llamado Sedlog 3.1 que se trata de un software cuyo fin es la elaboración de secciones estratigráficas. Este programa cuenta con la opción de suministrar los datos anteriormente mencionados en secciones, regidos por los cambios de Facies. Los datos se introducen de forma ordenada y separados por columnas.

Como se mencionó anteriormente se trata de un software estratigráfico que posee de fábrica un número variado de convenciones tanto para litología, fósiles, estructuras (químicas y físicas), por lo que las convenciones presentes se tomaron del software Sedlog 3.1. Como toda columna debe tener una escala y teniendo en cuenta que el bastón de Jacob mide 1, 5 metros, manejándose divisiones de 50 centímetros llegando a la escala de 1:50.

5.2.4 Elaboración del modelo geológico

Para el modelo geológico de la mina se consideró como variables el espesor de cada capa y el total del nivel yesífero, la localización geográfica (coordenadas x, y, z) y la litología de las capas, para el modelamiento tridimensional, simulando una perforación de las capas en diferentes estaciones. Los datos medidos en base a las variables se organizaron en tres tablas de Excel, en la primera tabla se agregaron los datos de la litología de las capas y sus espesores respectivos, la

segunda tabla es la localización geográfica y la profundidad la columna estratigráfica, y la tercera es para la simulación de la perforación donde se incorpora el dato de la profundidad, el rumbo y el buzamiento de la perforación, siendo estos datos 0° y 90° respectivamente, debido a que la perforación es vertical. Estas tablas en Excel se exportan al software de trabajo que es Leapfrog v. 4.0., el cual dibujó el modelo geológico con las variables que se plantearon.

5.2.5 Preparación de muestras en el laboratorio

En base a las muestras tomadas en la mina, éstas fueron empacadas con el mayor cuidado y etiquetadas para ser enviadas al laboratorio de Cemex en la planta de Los Patios para hacer los análisis de composición química con el método de Espectrometría de fluorescencia de rayos X (Fig 26), de acuerdo al procedimiento COI-ASC-IT-17 del laboratorio para la preparación de muestra:

- El proceso inicia en una trituradora de mandíbulas, disminuyendo el tamaño de la muestra.
- Se homogeniza y se cuartea la muestra triturada, tomando 20 gr de muestra.
- Se deshidrata la muestra en una mufla a $105^\circ \pm 5$ durante 120 minutos.
- Se toman 20 gr de la muestra de yeso, que serán sometidas a un pulverizador HERZOG durante 48 segundos, se adicionan tres gotas trietanolamina y se vuelve a cuartear.
- Se extraen 7 gr de la muestra pulverizada para hacer la pastilla prensada.
- Pesar 7 gramos de la muestra pulverizada en una cápsula de porcelana y adicionar 0.7 g de Cera compactante (WAX).

- Adicionar la muestra pulverizada dentro del dispositivo para prensar ejercer una presión de 250 KN durante 43 segundos.
- Se retira la pastilla y se marca por la cara más opaca, teniendo el criterio de no tocar la cara más lisa que es la superior ya por ese lado es que se realiza la lectura.
- Realizar la lectura en el Espectrómetro Axios max de Fluorescencia De Rayos X.
- Realizar la lectura en el Espectrómetro Axios max de fluorescencia de rayos x y por medio del software SuperQ Manage.



Figura 26. Depósito de las pastillas prensada en el porta-muestra y luego en la cámara de muestras del espectrómetro de fluorescencia de rayos X. Tomado de Cemex, Colombia (2017).

5.2.6 Análisis químico del potencial productivo de la mina

Con los resultados obtenidos en el laboratorio, se asignaron los códigos de las estaciones donde se tomaron las muestras para la ubicación geográfica de estas en el mapa de concentraciones, si las muestras fueron tomadas en el frente de avance de explotación se les asignan el código MNF_, seguido del # del túnel donde avanza (Tabla 4 y Fig. 27). Si las muestras fueron tomadas

a lo largo de las columnas de los túneles de la mina, se les asigna el código MNT, el número del túnel y los metros de distancia desde el inicio del túnel (Tabla 5 y Fig. 27).

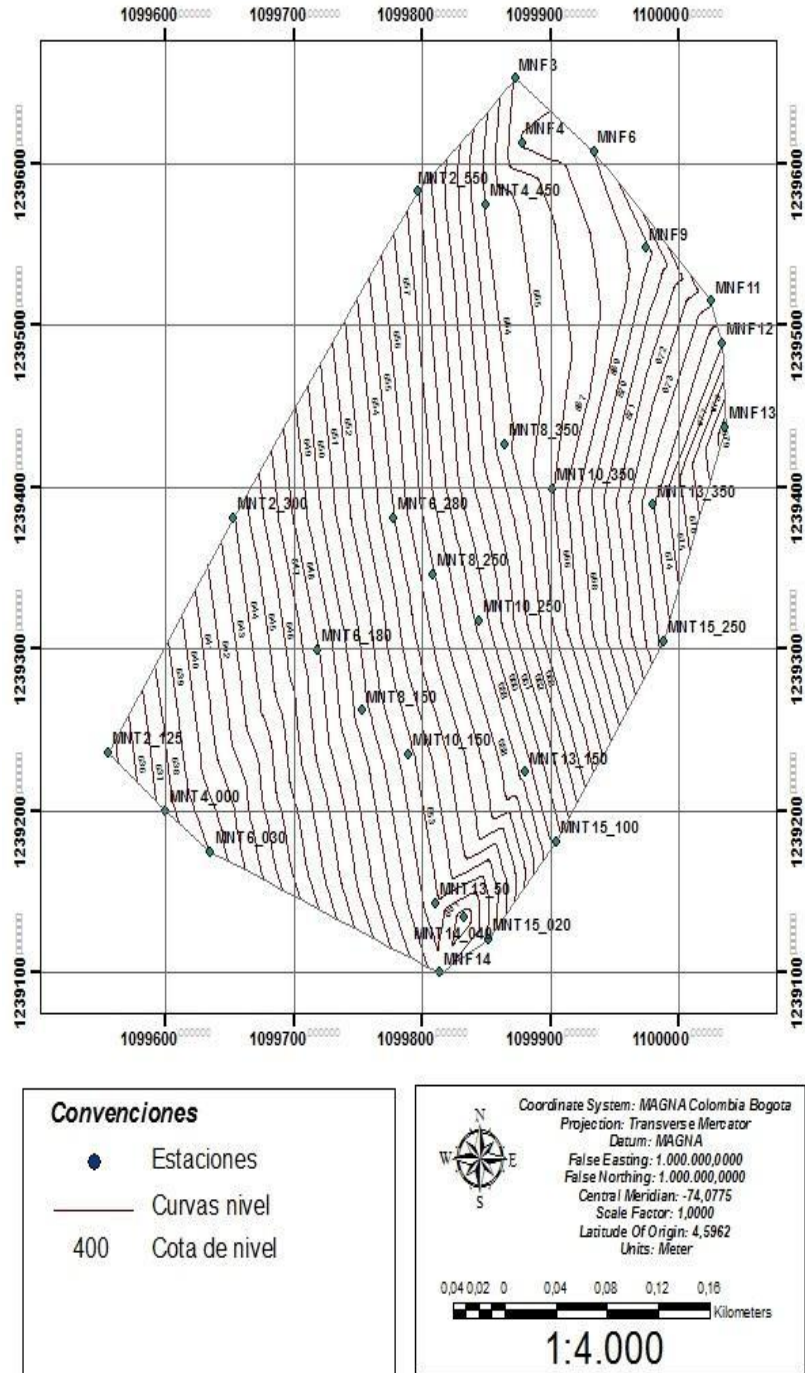


Figura 27. Mapa de la localización de las estaciones desarrolladas en el muestreo de la mina.

Tabla 4.

Descripción de los códigos que se asignaron para las muestras tomadas en el frente de avance de explotación.

Descripción de la Estación	Código	# de Túnel
Muestra en el Frente de avance de explotación	MNF_	3
		4
		6
		9
		11
		12
		13
		14

Tabla 5.

Descripción de los códigos que se asignaron para las muestras tomadas en las columnas de soporte de la mina a lo largo de los túneles.

Descripción de la Estación	Código	# de Túnel	Metros a lo largo del túnel
Muestra en la columna a lo largo del túnel	MNT	2_	125
			350
			550
	MNT	4_	000
			450
	MNT	6_	030
			180
	MNT	8_	280
			150
			250
	MNT	10_	350
			150
			250
	MNT	13_	350
			050
MNT	14_	150	
		350	
MNT	15_	040	
		020	
			100
			250

Después de denominar las muestras, se registraron en tablas de Excel (en formato *.xls) el código de la estación donde se tomaron las muestras, código de la muestra de laboratorio, las coordenadas geográficas, el nivel yesífero, las observaciones y los porcentajes químicos de la muestra de su respectiva estación, siendo esta tabla la base de datos para representar los valores de las concentraciones de SO₃ en la superficie de la mina. Estos mapas fueron realizados en el software ArcGIS 10.3.1, en el cual se exportaron los datos de las tablas, interpolando los porcentajes de SO₃ en cada capa de los niveles yesíferos por el método IDW. Se realizó por este método debido a que representaba con detalle las variaciones de las concentraciones de SO₃ en la mina, ilustrando los cambios y las degradaciones con respecto a los datos de cada estación, marcando zona de alta productiva y mejor calidad de yesos.

6. Marco de Referencia

En este capítulo se planteó el contexto a escala regional, local, estudios antecedentes al proyecto y los rasgos geológicos encontrados en campo.

6.1 Marco geológico regional

El basamento de Colombia se puede dividir en tres zonas separadas por las principales suturas (Suárez, 1990): (1) el escudo precámbrico Guyana en el este, (2) la Provincia Central de rocas metamórficas del Paleozoico-Precámbrico temprano, lo que subyace en las Cordilleras Central y Oriental, y (3) acreción de fragmentos de la corteza oceánica y los sedimentos y rocas volcánicas de subducción, que forman la Cordillera Occidental (Barrero, 1979; Alvarez, 1983; Duque-Caro,

1990). Megard (1987) interpretó la acreción del terreno occidental a lo largo de la falla Romeral, como una serie de colisiones discretas que comienzan en el Cretácico Inferior y que terminan en el Eoceno. La sutura entre el escudo de Guyana y la provincia Central es el Borde Llanero, que coincide aproximadamente con el empuje frontal del piedemonte Llanero (Suárez, 1990). Siguiendo el trabajo de Butler y Schamel (1988, 1989), Montgomery (1992) sugirieron que la distribución de las cuencas Cretácicas y Terciarias en el centro de Colombia fue posiblemente controlada por la reactivación de antiguas fallas (Cooper, 1995).

Durante el Triásico, Jurásico y Cretácico Temprano, Colombia fue periféricamente afectada por rifting relacionados con la eventual separación de Norte y Sur América en el proto-Caribe (Jaillard et al., 1990). Maze (1984) propusieron un mecanismo alternativo para la extensión en un entorno trasarco, que, dada la naturaleza oblicua de la zona de subducción, pudo haber tenido un componente transtensional. Ambos mecanismos probablemente contribuyeron a la extensión. El tiempo exacto de aparición del rifting es difícil de determinar debido a que los sedimentos clásticos continentales sinrift son difíciles hasta la fecha (Cooper, 1995).

Para Cooper (1995), el Valle Medio del Magdalena, la cuenca Llanos y la Cordillera Oriental son el resultado de una cuenca que comenzó durante el Triásico al cretáceo temprano, con un megasecuencia sinrift relacionada con la separación de América del Norte y del Sur en el proto-Caribe (Fig. 28). La megasecuencia sinrift comenzó con la deposición en un entorno continental, que se convirtió en marino parálisis y superficial en el Cretácico Temprano. El desarrollo de la Cuenca continuó en el Cretácico en un entorno trasarco al Este de la zona de subducción andina. La megasecuencia trasarco estaba dominado por la sedimentación marina somera y produjo una excelente roca generadora regional durante el Turoniano-Coniaciano. La deposición marina se

terminó abruptamente durante el Maastrichtiano temprano debido a la acumulación final de la Cordillera Occidental.

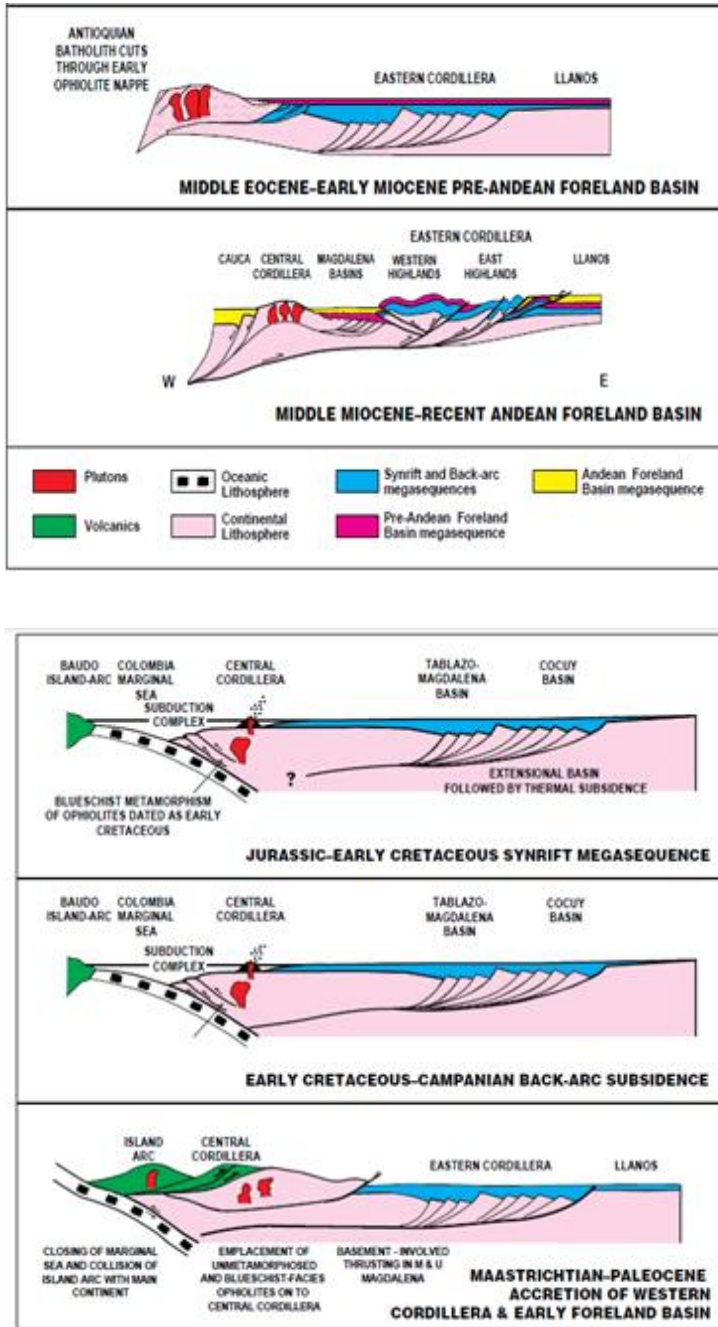


Figura 28. Evolución geológica de Colombia. Tomado Cooper, 1995.

La Cordillera Oriental (CO) es la rama oriental de los Andes colombianos, que se compone de tres cadenas montañosas: la Oriental, Central y Cordillera Occidental, que se funden hacia el sur en una sola gama (Fig. 29). El Valle del Magdalena separa las cordilleras Oriental y Central, y el Valle del Cauca separa la Cordillera Occidental y Central (Sarmiento, 2006).

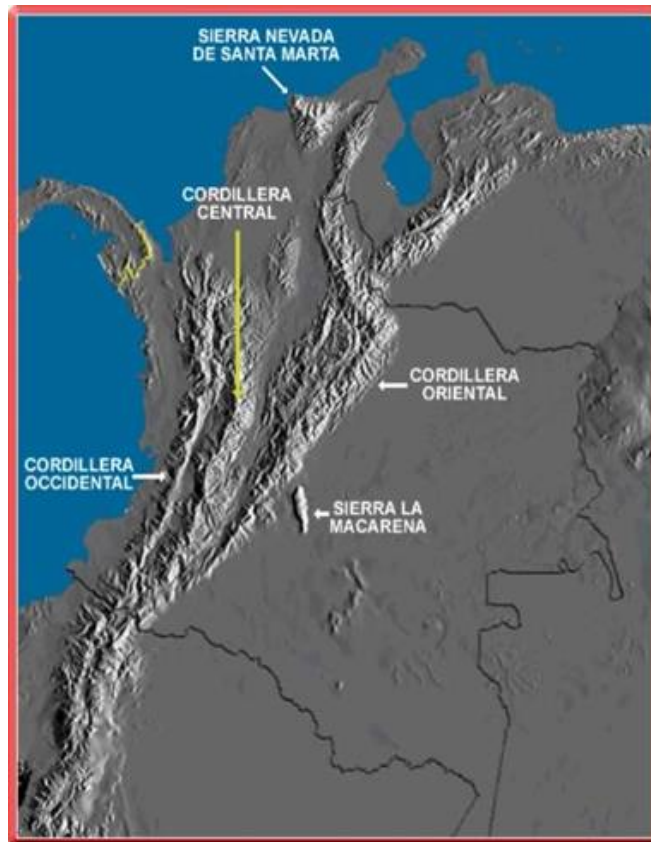


Figura 29. Imagen de la separación de los andes colombianos en 3 ramas que hacia el Norte se convierten en una sola. Tomado de www.todacolombia.com

La Cordillera Oriental, tectónicamente reporta la evolución estructural, más reciente del sistema andino, sufre una serie de transformaciones estructurales asociadas a esfuerzos de dos estilos diferentes (Gómez & Cuervo, 2012). La sedimentación del Cretácico Temprano estuvo concentrada principalmente en tres subcuencas amplias, asimétricas, limitadas por fallas

normales y ubicadas en el actual Valle Medio del Magdalena y parte media de cordillera Oriental; las subcuencas son Tablazo–Magdalena, Cocuy y Cundinamarca. Las subcuencas del Cocuy y la de Tablazo–Magdalena estaban ubicadas respectivamente al este y al oeste de un sistema de bloques levantados por fallas normales en la posición actual de los macizos de Santander y Floresta (Gaona, 2015).

Para Sarmiento (2006), la sedimentación se inició en la sub-cuenca del Tablazo, en el Jurásico y continuó durante el Cretácico Temprano localmente, (por ejemplo, la sección de Río Lebrija por Cediél, 1968). En otras áreas, las rocas sedimentarias del Cretácico descansan con discordancia angular sobre principios del Mesozoico, Paleozoico, o incluso rocas del precámbrico. En la sub-cuenca del Tablazo, capas basales corresponden a areniscas (Formación Los Santos, Tambor y Arcabuco) depositados en ambientes fluviales, por lo general con los sedimentos detríticos derivados de bloques de fallas levantados. Durante el Berriasiano, el mar inundó la cuenca de la parte norte de la Cordillera Central hacia la subcuenca Cundinamarca (Etayo-Serna *et al.*, 1976 en Sarmiento, 2006).

Post-Berriasiano, el suministro de sedimentos incrementó y abrumó el hundimiento de la cuenca, lo que resulta en progradación de turbiditas del sistema de abanico y localmente en progradación de arenas deltaicas durante el Hauteriviano. En toda la cuenca de la Cordillera Oriental hay cambios de espesor laterales abruptos y falla relacionada con aluviões o deposición de turbiditas prueban diferentes condiciones tectónicas de hundimientos locales en el Cretácico Temprano.

6.2 Marco geológico local

En el marco geológico local se expondrán los rasgos geológicos más característicos presentes en el área de trabajo interpretada de acuerdo a los afloramientos encontrados en campo.

6.2.1 Geología general de la Mesa de los Santos

La zona de estudio se encuentra de la Cordillera Oriental, dentro de la Mesa de Los Santos, donde se una secuencia estratigráfica del Mesozoico, que comienza en el Jurásico medio hasta el Cretácico, siendo la más antigua la Formación Jordán, hasta el Aptiano con la Formación Paja. “La Mesa de Los Santos se encuentra entre la Falla de Bucaramanga al Este y la de Suárez al Oeste paralela al río Sogamoso, estas manifiestan una tectónica de fallas y flexiones, que reflejan fallas de zócalo” (Julivert *et al.*, 2016. p. 9). En la Mesa de Los Santos, la evidencia estructural se refleja en el patrón de drenajes producto de una red de fallas indicada por lineamientos, con poco desplazamiento vertical, siendo la Falla de Los Santos la de mayor desplazamiento en la superficie de la mesa y su dirección va a lo largo de la quebrada del mismo nombre (Ward *et al.*, 1973. p. 117).

La Falla de Bucaramanga es una extensión regional que puede trazarse desde cerca del sur del Macizo de Santander hasta la costa Caribe, al oeste de Santa Marta. A lo largo de la mayor parte de su extensión, presenta un notable lineamiento recto, expresado en valles lineados y diferencias litológicas a cada lado, con observaciones que la falla tiene un buzamiento fuerte (Ward *et al.*, p.118). Debido a estos rasgos estructurales de la Falla de Bucaramanga, Ward *et al.*, (1973) comenta, “que es una falla de rumbo de componente vertical, considerando la Falla de

Bucaramanga con una falla marginal de un bloque montañoso levantado (Macizo de Santander), con desplazamientos verticales con movimiento ascendiente” (p. 118).

Otra falla de escala regional que afecta la Mesa de Los Santos es la Falla de Suárez que es un accidente estructural importante que se orienta en forma paralela al cauce del río Suárez hacia su margen izquierda prolongándose hacia el sur y termina al norte contra la Falla de Bucaramanga, siendo su desplazamiento vertical variando entre 400 y 700m levantando el bloque occidental (Pulido *et al.*, 1985). Al sur de la zona de estudio se encuentra la falla de Aratoca, que toma una dirección NNW-SSE hasta cruzar el Río Chicamocha, luego tomando una dirección SE hasta perder dentro del complejo metamórfico del Macizo de Santander. El tramo W de la falla está hundido con un salto de 400 m o mayor. La Falla de Aratoca fue determinada en una edad precretácica y post Girón, debido a que esta pone en contacto los sedimentos de Girón con la Formación Silgará, esto evidencia que la falla quedó fosilizada por la sedimentación cretácica (Julivert & Téllez, 2016. p.9).

6.2.2 Geología del área de trabajo

En la zona de estudio, la unidad litoestratigráfica de interés en este trabajo es la Formación Rosablanca, que aflora en la parte occidental del municipio de Los Santos en una zona escarpada con poca vegetación, clima árido, que forma parte del cañón del Río Chicamocha, donde se encuentran las minas de yeso.

Alrededor de la zona, se encontró que la Formación Rosablanca, hace parte de una secuencia lito-estratigráfica concordante que empezó su depositación en el Jurásico Superior con la Formación Girón, hasta el Cretácico Hauteriviano-Aptiano con la Formación Paja y algunos

depósitos Cuaternarios, producto de eventos de la acción erosiva del ambiente moderno donde afloran estos cuerpos rocosos. Así se describieron estas unidades que están exhibidas en el mapa geológico (Apéndice 1, Fig. 34):

6.2.2.1 *Formación Los Santos*

La Formación Los Santos se infirió en la parte media de las pendientes escarpadas del cañón del Chicamocha con la misma inclinación regional NE-SW, con contacto neto hacia la base con la Formación Girón (Jg) y hacia el tope también de contacto neto con la Formación Rosablanca (Kir) como se observa en la figura 31. Debido a la geomorfología de la zona, donde predominan las pendientes escarpadas, el acceso a los afloramientos de la Formación Los Santos es riesgoso, se determinaron la disposición de esta formación en la zona por medio de panorámicas y fotos satelitales de Google Earth.

6.2.2.2 *Formación Rosa Blanca*

Es concordante con la infrayacente Formación Los Santos y la suprayacente Formación Paja. En la zona de trabajo se levantaron 150 metros de columna, definiendo la Formación como una intercalación de calizas mudstone con shales, donde está contenido el yeso en explotación hacia la base, paquete calizas mudstone en su segundo nivel con algunas capas de chert, seguida un paquete de calizas packstone y wackstone de tonalidad grisácea a oscura en su tercer nivel, continuando intercalación de calizas mudstone y calizas wackstone con alto contenido de fósiles, y hacia el tope de la formación se encontró un nivel de calizas wackstone y mudstone oscuras

meteorizadas intercaladas con capas de shales muy fósiles. Se encontró la Formación Rosablanca en contacto neto con la Formación Paja.



Figura 30. Contacto neto en campo entre las Formación Rosablanca (Kir) y Paja (Kip). Vista al Sureste.

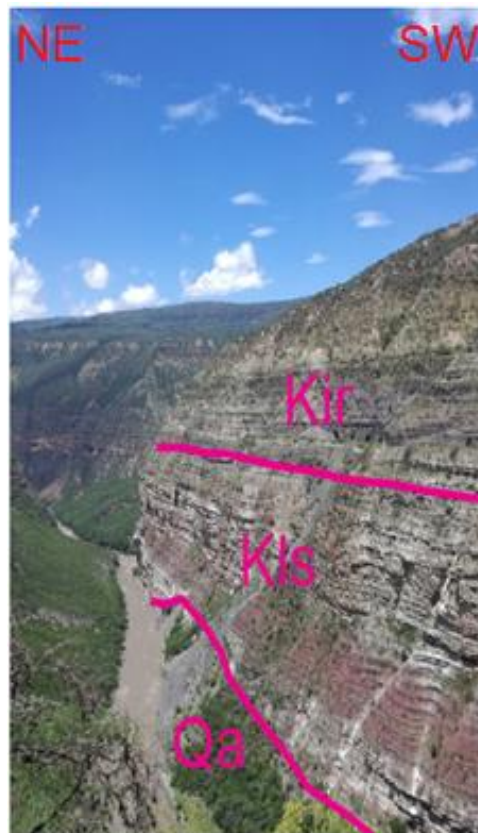


Figura 31. Vista panorámica de la secuencia estratigráfica en la ladera escarpada del Cañón del Chicamocha, donde se infirieron los contactos de las unidades lito-estratigráficas identificadas teniendo como parámetros el color de las capas, el estilo de la pendiente y la bibliografía existente sobre estas unidades. Se observa la extensión de la Formación Los Santos y Rosablanca. Vista al Sureste.

En el área de las minas en Los Santos, Eljaiek & Moreno (1991) definieron cinco niveles dentro de la Formación Rosablanca, estos comprenden:

Nivel I: Calizas micríticas color gris oscuro intercaladas con lutitas calcáreas grises, contienen fósiles en la base y techo de la secuencia con un espesor de 58,23 m, la base de esta formación corresponde a los bancos de yeso de las minas.

Nivel II: Calizas micríticas, masivas y laminadas con lutitas fósiles color gris. El espesor es de 25 m.

Nivel III: Calizas arenosas (esparrudita), color gris con pequeñas secuencias de lutitas calcáreas arenosas y presencia de fósiles (gastrópodos, bivalvos, exogiras, amonites y equinodermos). Tiene un espesor de 38,9 m.

Nivel IV: intercalación de lutitas y calizas con predominio de las primeras: espesor de 180 m.

Nivel V: Calizas esparíticas fosilíferas (bioesparruditas), color gris claro y un espesor de 15m.

De acuerdo a los niveles descritos Eljaiek & Moreno (1991) y el trabajo de campo, se cartografiaron 4 miembros de la Formación Rosablanca para su respectiva cartografía detallada:

Miembro yesífero de la base (Kry): Intercalación de calizas mudstone masivas y limolitas oscuras con contenido de yeso con estructuras masiva y plano-paralela a 20 m del contacto con la Formación Los Santos. Después de los mantos yesíferos se presenta un paquete de calizas

mudstone oscuras y calizas mudstone color gris a morado con capas de chert. En el trabajo de campo se cartografió en el mapa geológico el Nivel I y el Nivel II de Eljaiek & Moreno (1991) en esta unidad, denominada miembro yesífero (Kry), dado que por la pendiente escarpada no se encontraron afloramientos del Nivel II.

Miembro de capas compactas de calizas (Krc): Paquete de calizas compactas, masivas de textura wackestone a packstone (Durham, 1962), con encontraron equinodermos, bivalvos y restos de conchas. Hacia la base del miembro se distinguieron calizas grises de textura packstone (Durham, 1962). Espesor del miembro de 40 m. En los afloramientos de la zona de estudio se identificó el Nivel III de calizas arenosas de Eljaiek & Moreno (1991), que en este proyecto fue cartografiado como miembro de calizas (Krc), con la diferencia del registro fosilífero encontrado (Fig. 32).

Miembro de calizas lodosas (Krcm): intercalación de calizas mudstone con calizas wackestone de alto contenido de fósiles (amonitas, bivalvos y gastrópodos). Se correlacionó esta unidad con el Nivel IV de Eljaiek & Moreno (1991), pero lo observado en campo es que la intercalación es caliza mudstone de muy alto contenido fosilífero, muy fósiles, con unas calizas oscuras, masivas. El espesor de este miembro es de 180 m inferido del Nivel IV de Eljaiek & Moreno (1991), con este espesor se estableció el contacto superior de este miembro a partir del contacto de la base cartografiada en campo, puesto que el contacto del tope está cubierto por un coluvión (Fig. 32).

Miembro superior (Krms): hacia el tope en contacto neto con la Formación Paja, se observó un paquete de calizas grisáceas wackestone de 50 cm, seguida de una intercalación de calizas mudstone grisáceas masivas, meteorizadas tomando un tono rojizo con lodolitas muy fósiles, reconociéndose que hacia el contacto de estas unidades hay una decreción del grano y más aporte

terrígeno. Hacia la base de este miembro no se localizaron afloramiento debido a que está cubierta, por lo tanto, fue inferida con respecto a la literatura consultada.



Figura 32. Vista panorámica hacia el Oeste de los miembros de la Formación Rosablanca determinados en campo. Se observa el miembro yesífero Kry, el miembro de calizas compactas Krc y el miembro Krcm de calizas lodosas que es enterrado por un cuerpo cuaternario (Qd) en el tope del cerro.

6.2.2.3 Formación Paja

La Formación Paja fue descrita por Wheeler en 1929 y su sección tipo alcanza unos 625 m. Al noroeste del área del proyecto se encontró el contacto neto con la Formación Rosablanca (Fig.

30), donde se encontró la base de esta formación conformada por shales negros intercalados con niveles de calizas, donde los shales más cercanos al contacto contenían láminas de yeso.

6.2.2.4 Depósitos Cuaternarios

Se identificaron los depósitos cuaternarios por medio del reconocimiento de campo en carretera y por las fotografías satelitales de Google Earth se señalaron las dimensiones de los cuerpos con respecto al área a cartografiar. Se observaron depósitos coluviales de gran dimensión producto de la acción del intemperismo de las rocas aflorantes de la zona y la erosión de los materiales por medio de correntías de agua o gravedad. Los depósitos aluviales se identificaron al borde del río Chicamocha.

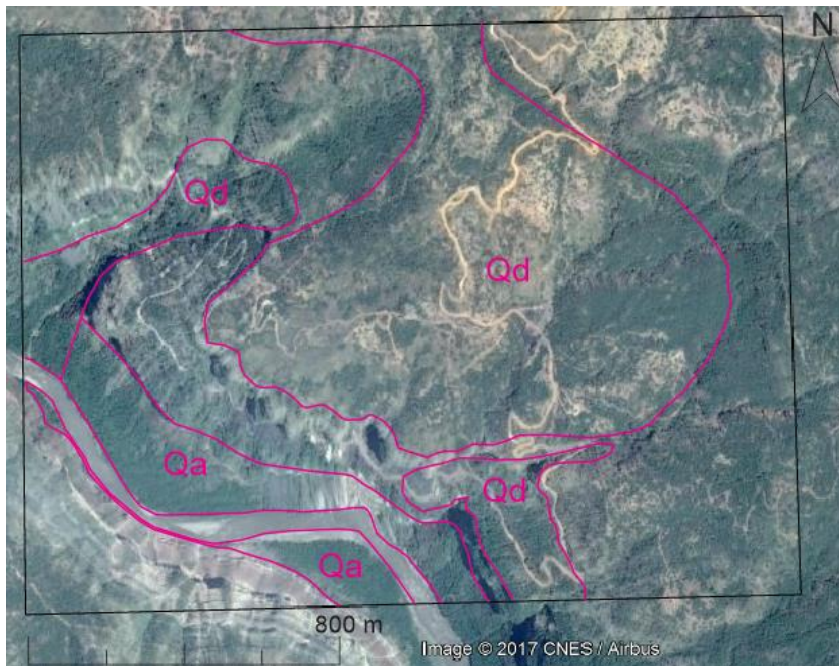


Figura 33. Imagen de las dimensiones de depósitos cuaternarios identificadas en el mapa satelital de la zona de estudio. Tomada de Google Earth.

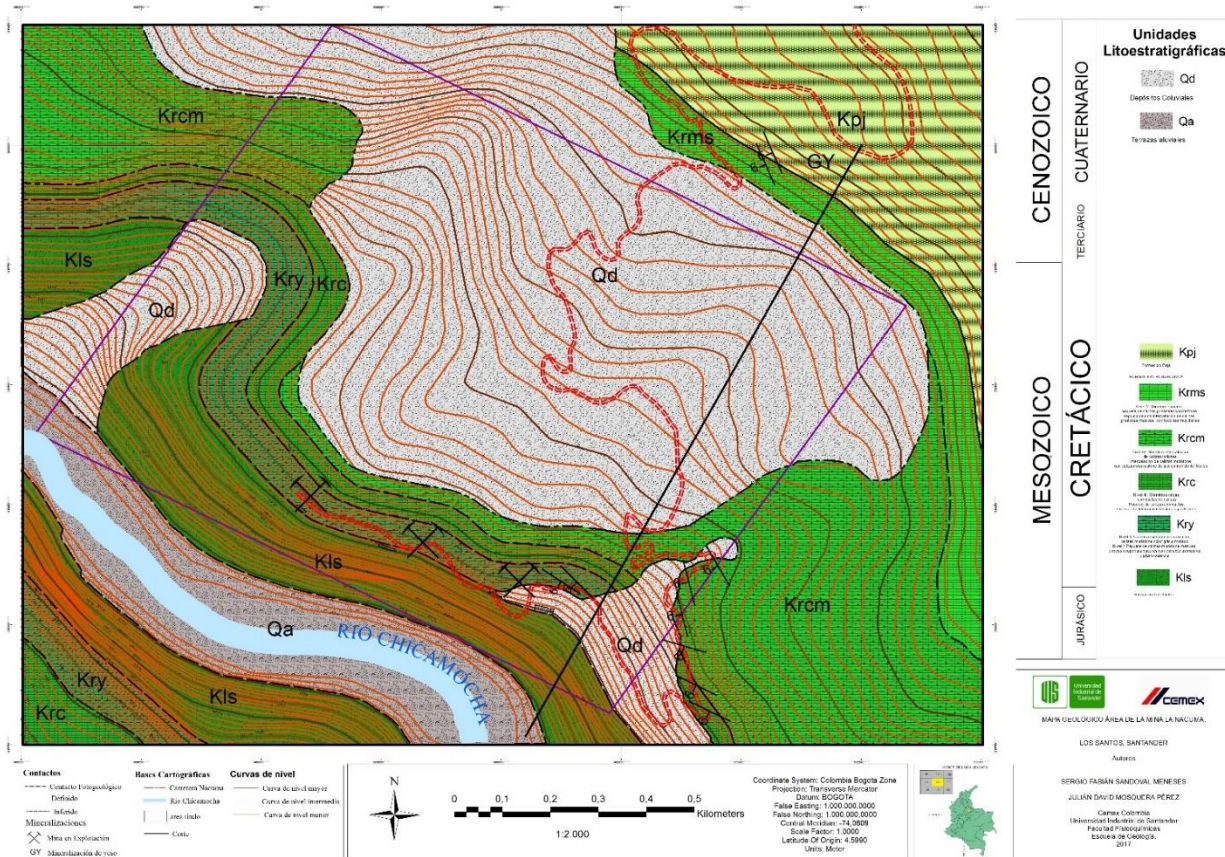


Figura 34. Mapa geológico de la zona de campo, donde se reconocieron los rasgos geológicos más relevantes en los afloramientos (para mayor detalle ir al Apéndice 1).

6.2.3 Geología estructural

La zona de estudio es muy característica debido a la poca actividad tectónica, la mayor evidencia son los buzamientos que fueron tomados son de 4° a 6° en dirección al SW (Fig. 35). En el sector más cercano a las minas se observa diaclasamiento en las capas, pero estos son principalmente producto de las explosiones que se realizan en los frentes de avance. Se encontraron lineamientos, pero de dimensión muy local donde algunas placas son desplazadas con cinemática normal, pero en muy menor medida y podría estar relacionada a la Falla de Aratocha que se encuentra hundida.

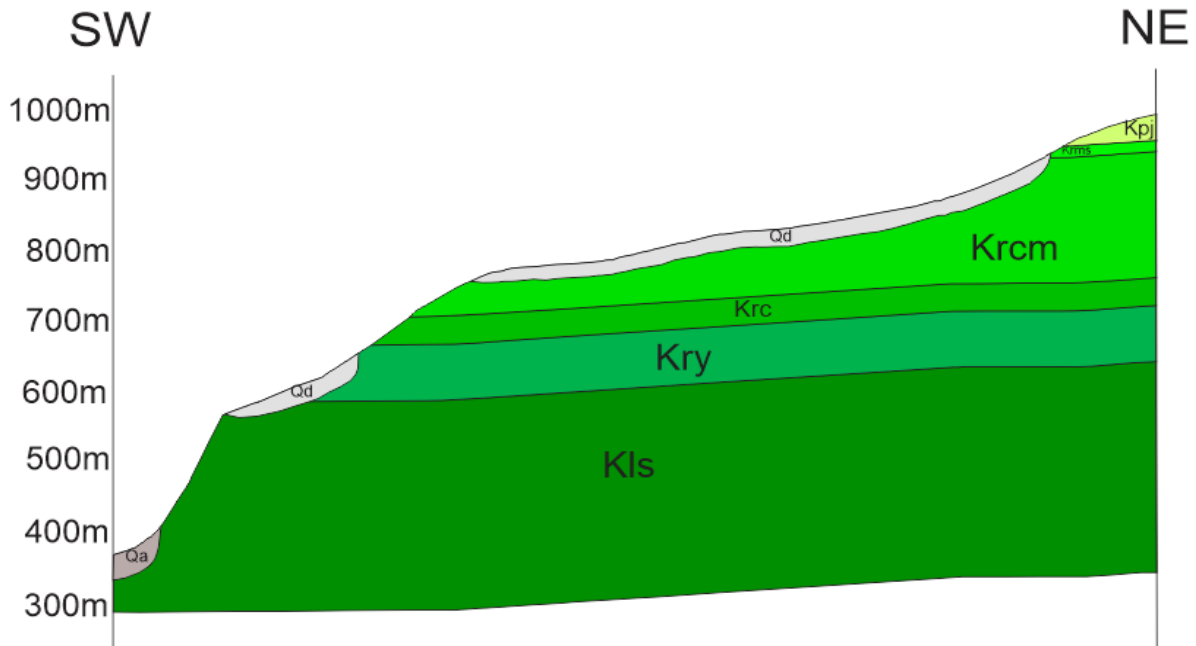


Figura 35. Corte geológico de la zona de estudio. Se observa la inclinación regional sub-horizontal de las capas con sentido NE – SW, observándose que las unidades lito-estratigráficas van acorde a la topografía.

Diagramas de Esfuerzos

Los diagramas de esfuerzos son herramientas utilizadas para indicar la tendencia general que presenta una zona respecto a la influencia ya sea tectónica regional o local. Los datos presentes en este proyecto son particularmente similares presentando una tendencia de Rumbo NE-SW y una inclinación muy baja regional de 6° como se muestra en la siguiente imagen (Fig.36):

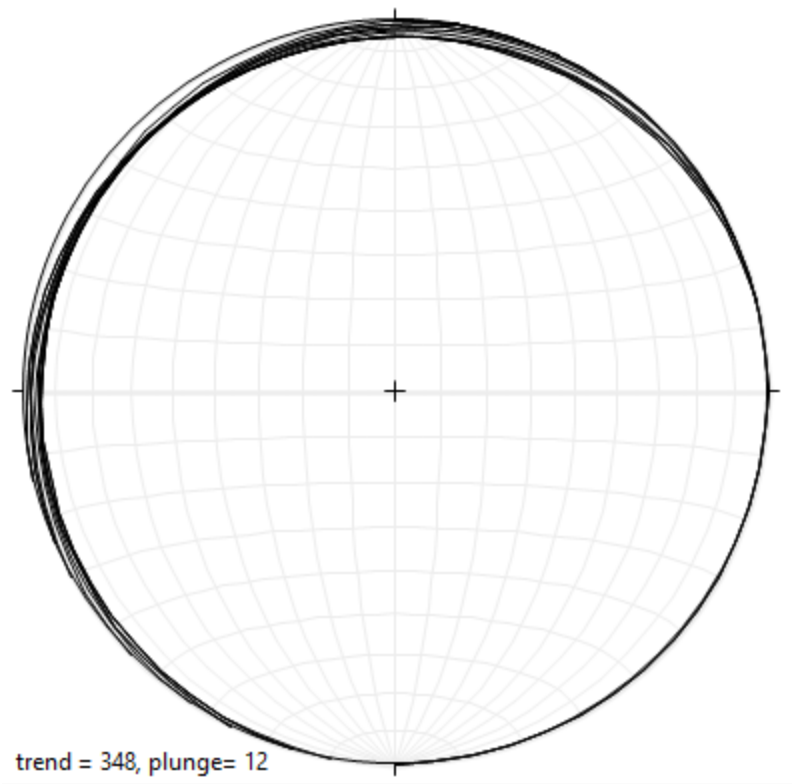


Figura 36. Diagrama de polos, indicando la mayor tendencia de datos, y la tendencia de rumbo de la zona de estudio. Tomado de StereoNet 9.8.3

7. Resultados

En base a los datos tomados en campo y procesados en oficina mediante a los métodos de trabajo respectivos, se obtuvieron estos resultados que contribuyeron al cumplimiento de los objetivos en este proyecto:

7.1 Petrografía

La petrografía consistió en el análisis detallado de 5 muestras en sección delgada mediante un microscopio petrográfico, las cuales correspondieron a los 5 mantos de interés para la explotación del mineral yeso en la mina La Nacuma (Chaqueta 2, Chaqueta 1, Lajeo, Churca 2, Churca 1). Este estudio petrográfico se hizo con el fin de analizar de forma más detallada comparada con el análisis en muestra de mano sobre la composición textural y composicional de los mantos, disposición y porcentaje del mineral de interés (Yeso) y los demás minerales asociados en la génesis de este tipo de yacimiento mineral.

Es importante tener en cuenta que la respectiva clasificación se hizo basándonos en Dumhan (1962). Como ya se mencionó explícitamente en la metodología de petrología se procedió a hacer un reconocimiento de textura, estructuras, composición química, conteo de puntos y la respectiva clasificación de la muestra arrojando los siguientes resultados de base a tope de la sección de interés:

7.1.1 Chaqueta 2

Roca calcárea de tipo Mudstone según (Dumhan, 1962) la cual presenta alto contenido de yeso expuesto en la roca en forma de vetillas (tabular), (Fig. 37.C) o en la matriz (anhidrita masivo) de la roca, este último tipo de yeso se encuentra en mayor porcentaje, se puede caracterizar gracias a sus altos colores de birrefringencia y su forma radial típica (Fig. 37.A). Esta muestra tiene presencia de tapiz algáceo la cual se encuentra paralela a la laminación igual que las vetillas mencionadas anteriormente, estas algas y los granos de Dolomita (Fig. 37.B) representan el componente calcáreo de la roca. La muestra presenta una baja concentración de pirita y cuarzo

autigénico. El tamaño de grano hace referencia a lodo y las dimensiones de las vetillas son de aproximadamente 1 mm a 0.25 mm.

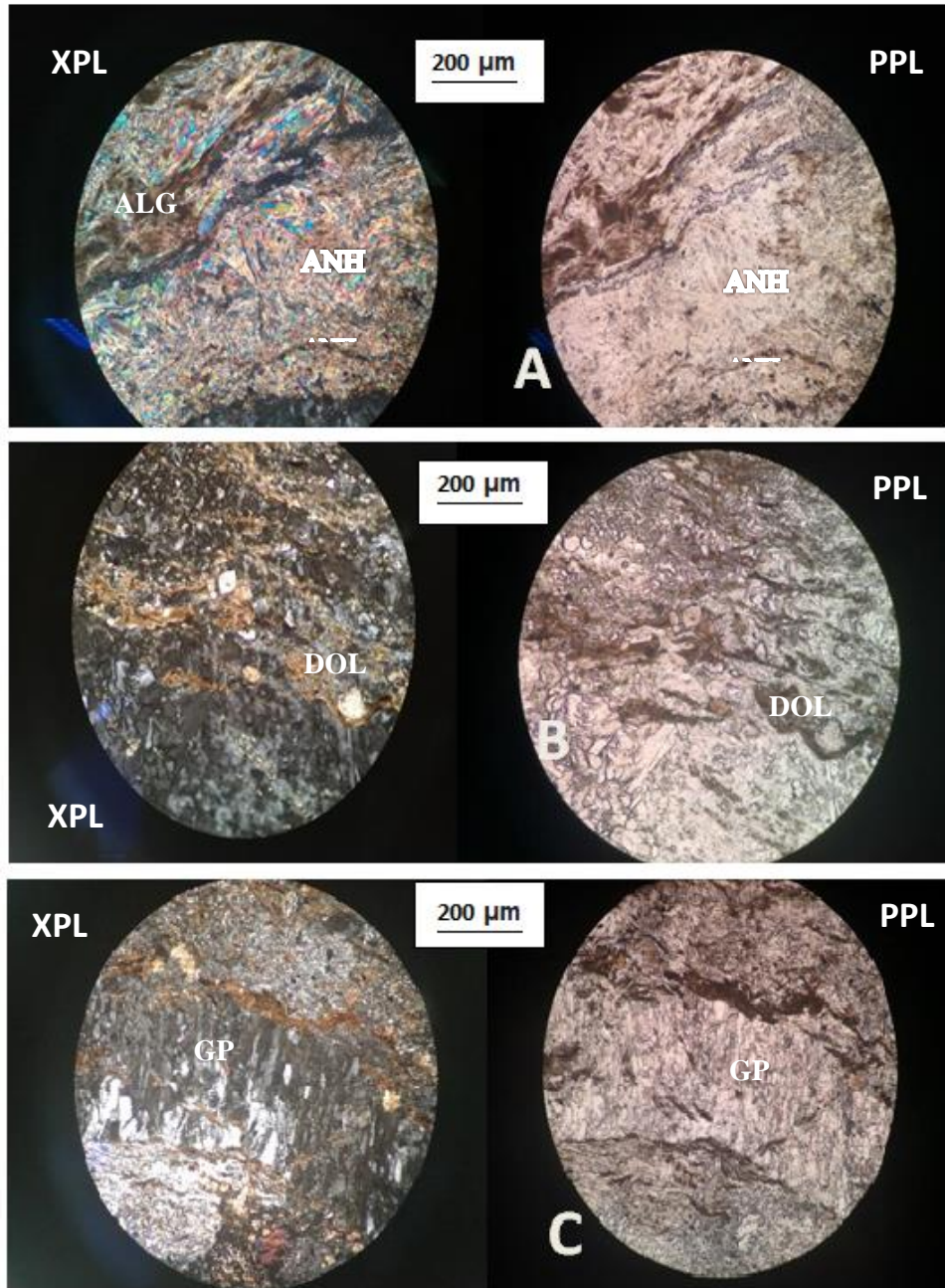


Figura 37. Sección delgada del nivel Chaqueta 2. A. Anhidrita con su forma radiada representativa. B. Cristales de Dolomitas. C. Yeso tabular en Vetillas. (Objetivo 10x).

7.1.2 Chaqueta 1

Roca caliza de tipo Mudstone (Dumhan, 1962), la cual presenta niveles de carbonatos elevados, similares con los niveles de Yeso y Anhidrita. Es de resaltar que en este nivel sigue predominando la Anhidrita sobre el Yeso tabular. La muestra presenta niveles de Micrita representados en el extenso cuerpo algáceo que se muestra en la roca, que es un alto indicativo del tipo de ambiente en que se depositaron estos niveles, la presencia de Dolomita es otro componente calcáreo en la roca la cual se puede ver en algunos sectores en baja proporción. Se puede observar un reemplazamiento de yeso ya que este a diferencia de Chaqueta 2 no se presenta en láminas si no en "lentes" rodeados por una matriz de Anhidrita o Algas, de la misma manera la anhidrita también se puede observar en "lentes" rodeada por el cuerpo algáceo (Fig. 38). El cuarzo y la pirita se siguen presentando en niveles muy bajos. En cuando a la laminación es de tipo irregular. El tamaño de grano de la roca sigue siendo muy fino.

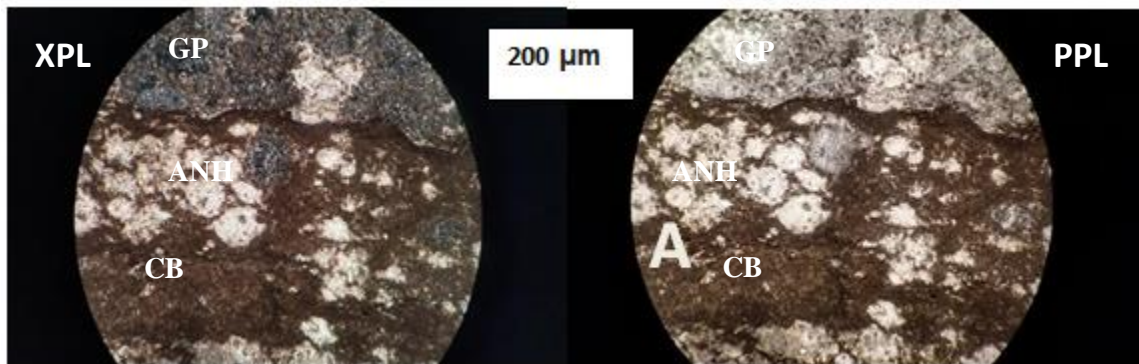


Figura 38. Sección delgada del manto Chaqueta 1. Se puede observar la forma de "lentes" en que se presenta la anhidrita y el yeso, envueltos en el cuerpo algáceo. (Objetivo 10x).

7.1.3 Lajeo

Roca química evaporita compuesta en casi su totalidad de yeso en forma masiva es decir regado por toda la muestra, en algunos sectores se distingue muy bien su forma tabular, además del yeso en algunas partes de la matriz se alcanzan a distinguir granos de Anhidrita, pero en esta muestra a comparación de las anteriores el porcentaje es relativamente bajo. Se alcanzan a distinguir algunos Alquíminos como Bivalvos con proceso de recristalización de anhidrita (Fig. 39.B). Una curiosidad en esta muestra es la presencia de lentes de yeso lo cual se debe a una recristalización sobre estas estructuras (Fig. 39.A), el tamaño de los granos es muy fino y en esta sección no se presenta ningún tipo de laminación. El porcentaje de pirita y cuarzo autigénico sigue siendo muy bajo.

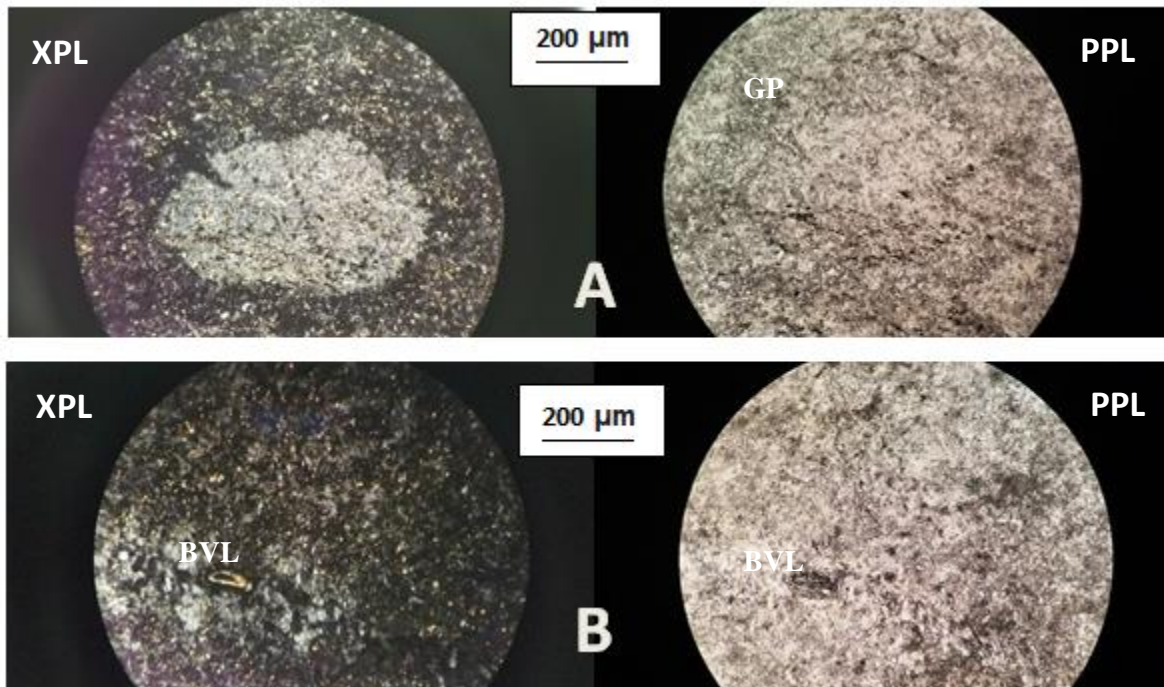


Figura 39. Sección delgada del manto Lajeo. A. Se muestra la forma de “lentes” en las que se presenta el reemplazamiento del yeso. B. Bivalvo presente en la muestra. (Objetivo 10x).

7.1.4 Churca 2

Roca calcarea mudstone (Dumhan 1962), como se muestra en la Fig. 40. A los altos niveles de yeso se representan en vetillas con máximo 1 mm de espesor o en forma de anhidrita en toda la matriz. Estas vetillas son congruentes a la laminación la cual es plano-paralela continua. La muestra presenta algunos granos de dolomita dispersos. Esta muestra marca un cambio en cuanto a la presencia de alquímicos ya que los pellets o peloides ganan mucho más espacio sobre los cuerpos de algas, predominando estos últimos en casi toda la roca (Fig. 40.B). Como en las anteriores muestras el cuarzo y la pirita sigue siendo muy escasa. Los pellets presentan unas dimensiones que van de 0.08 mm y menores.

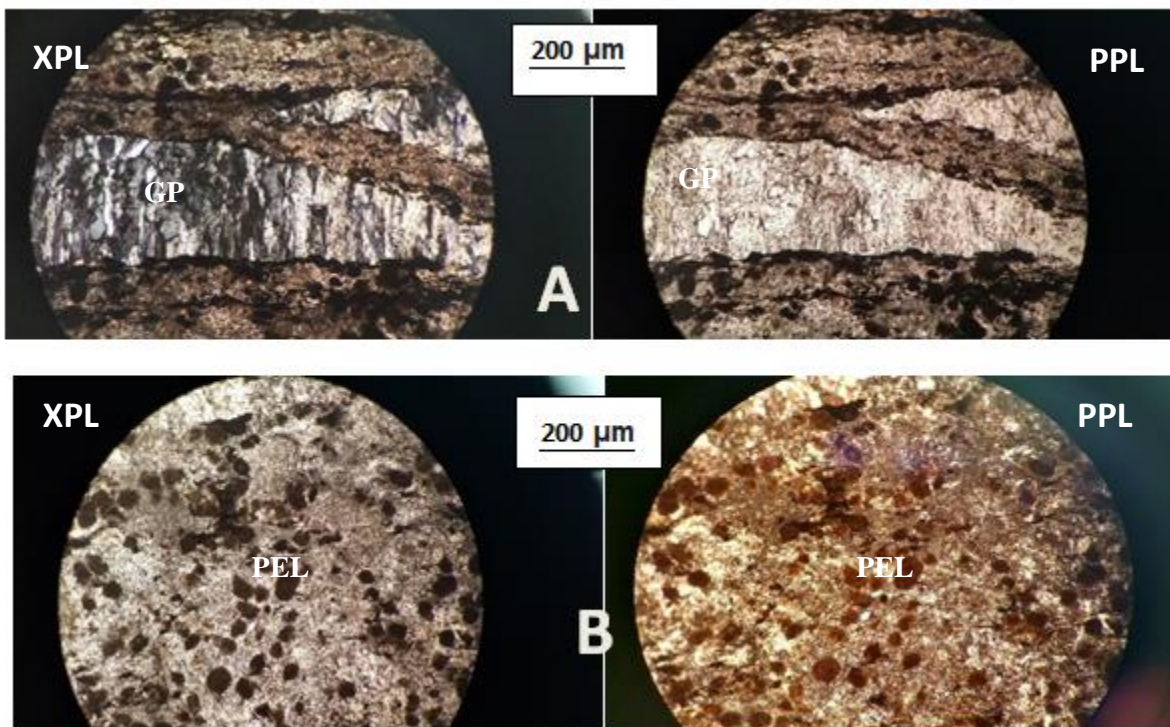


Figura 40. Sección delgada del manto Churca 2. A. Disposición de los niveles de yeso, vetillas fracturadas. B. Presencia de Pellets en gran porcentaje. (Objetivo 10x).

7.1.5 Churca 1

Roca calcárea de tipo mudstone (Dumhan 1962) con niveles yesíferos altos los cuales se presentan en forma de yeso tabular y anhidrita, ambos componentes están dispuestos en la matriz o en algunos sectores en pequeñas vetillas de dimensiones alrededor de 0.304 mm. En cuanto al componente calcareo este está dispuesto en un matriz lodosa (micrita) o en aloquímicos como peloides y bioclastos (bivalvos) y algunos cristales de dolomita (dolomitización). En algunos sectores de la muestra se evidencia esparitización (micrita pasando a esparita) como se muestra en la Fig. 41. En comparación a las demás muestras la presencia de Anhidrita es muy baja y la pirita no aparece en este nivel. La laminación es irregular.

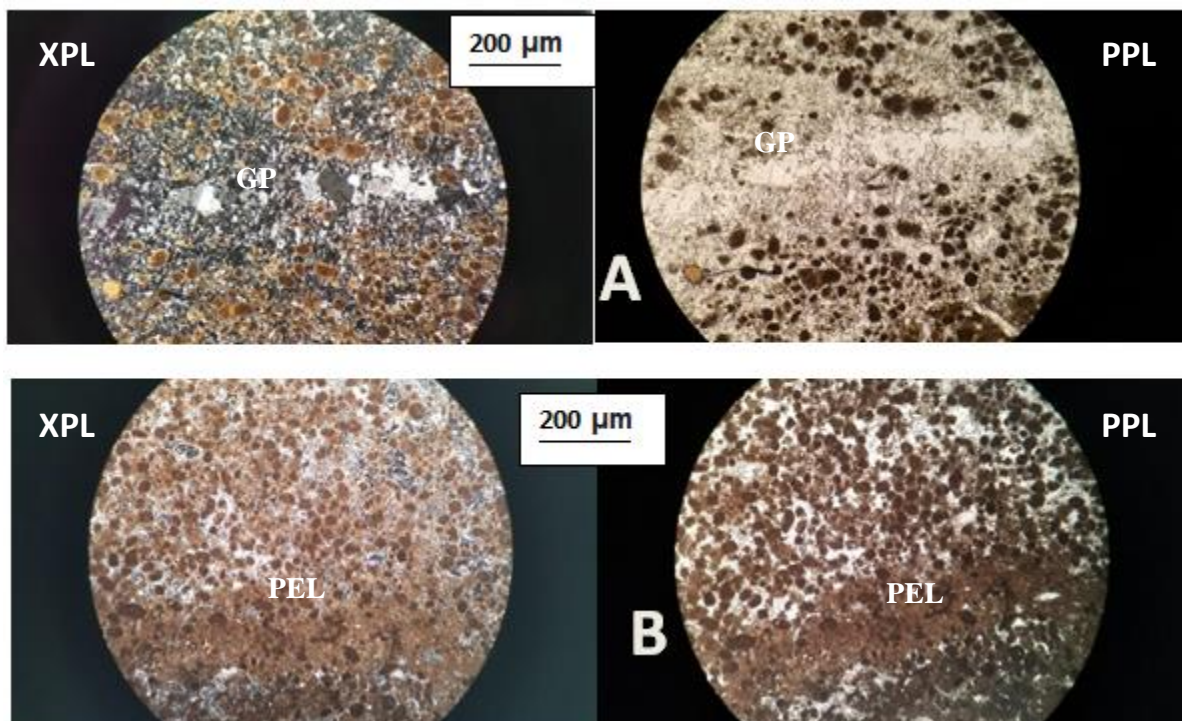


Figura 41. Sección delgada del manto Churca 1. A. Disposición del yeso en forma de pequeñas vetillas irregulares. B. Presencia de alquímicos en la muestra Pellets y Bivalvos. (Objetivo 10x).

La clasificación de estas secciones delgadas tuvo tres criterios de consideración el primero de ellos fue la composición textural, seguido de un reconocimiento composicional arrojado en porcentajes para cada mineral y el ultimo criterio muy importante fue tener en cuenta que estas muestras presentan altos niveles de yeso, pero la roca encajante es carbonatada. (Apéndice 11).

7.2 Análisis estratigráfico

El análisis estratigráfico se realizó a partir de los datos tomados en el trabajo de campo y registrados en las secciones estratigráficas levantadas El levantamiento estratigráfico de la Formación Rosablanca empezó desde la base de los mantos de explotación de los yesos, que según Vargas & Cruz, 1968, se encuentran estratigráficamente encima a 20 m del contacto infrayacente con la Formación Los Santos. También fue un factor importante para este análisis, el estudio petrográfico que se le realizó a los mantos (niveles yesíferos) de la mina.

Aunque los datos recolectados en campo y por medio de la petrografía son extensos, estos no alcanzan a cubrir la totalidad de la Formación Rosa Blanca que para esta zona según Julivert (1958) y Zamarreño (1963) comprende una potencia que va de 300 a 318 m por esta razón también se tomó registro bibliográfico con el fin de completar este análisis.

Sección 1

La primera sección comprende un espesor de 15 metros levantada en la entrada principal de la mina La Nacuma. Esta columna estratigráfica expone los niveles yesíferos de interés, este fue el criterio por el cual se decidió realizar el levantamiento estratigráfico en este sector.

La sección expone en la base unos paquetes de calizas mudstone negras con laminación plano-paralela y en algunos pequeñas ondulitas, con niveles de minerales evaporíticos en alto porcentaje (yeso, anhidrita) debido a estos niveles altos se podrían catalogar como calizas evaporíticas, estos paquetes que corresponden a los mantos explotados en la mina La Nacuma (Chaqueta 2, Chaqueta 1, Churca 2, Churca 1) se encuentran intercalados con lodolitas calcáreas con niveles de yeso muy bajos y un paquete de 1.5 m de espesor clasificado como una evaporita por su alto contenido de yeso el cual corresponde a Lajeo (Fig. 42).

Hacia la parte media se manifiestan unos paquetes de calizas mudstone negras con laminación plano paralela pero a diferencia del anterior paquete la presencia de evaporitas es casi nula, este paquete se presenta con intercalaciones lodolitas calcáreas. Finalmente el tope de la sección sigue con la presencia de paquetes de calizas mudstone masivas de tonalidades moradas a azuladas y un nivel de chert, este chert puede explicarse como un reemplazamiento de la roca encajante debido a silicificación (Apéndice 2).

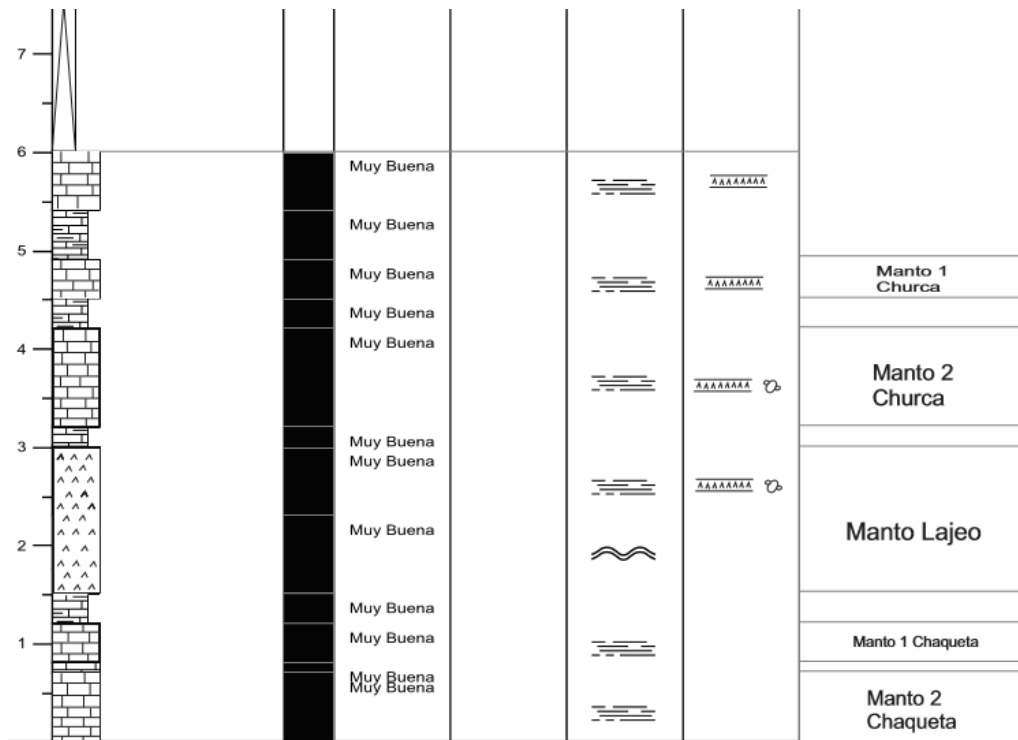


Figura 42. Representación de los niveles yesíferos en la sección 1, características físicas y químicas. Escala de la columna 1:50. Tomado de Sedlog 3.1.

Sección 2

La segunda sección se levantó hacia la parte SE de la zona de estudio a lo largo de toda la carretera que comunica a Los Santos con la mina La Nacuma. Esta es la sección más extensa con un espesor de 119.5 m. Se tomó este tramo ya que la exposición de la Formación Rosa Blanca en este sector era extensa y se podía tener una buena apreciación de las facies desarrolladas en este sector de la Formación.

La columna estratigráfica a la base expone una serie de calizas masivas packstone y wackstone grises intercaladas con niveles menores de calizas mudstone del mismo color, este paquete de calizas no presenta ningún tipo de laminación pero si a diferencia de la Sección 1 son calizas con presencias de aloquímicos en este caso organismos fósiles (bivalvos, braquiópodos,

gasterópodos). Estas calizas tienen la particularidad de presentar recristalización de carbonatos en vetillas por lo que esta recristalización es posterior a su diagénesis, también se nota la presencia de lodolitas calcáreas en baja proporción entre los niveles de calizas masivas.

En la mitad de la columna el tamaño de grano de las calizas aumenta a wackstone color gris oscura casi en su totalidad, vemos como la presencia de calizas de tamaño menor pierde espacio, seguimos viendo el alto contenido de aloquímicos casi en toda la sección esta vez representada en restos de conchas, bivalvos y ammonites y algunas galerías.

Hacia el tope de la sección de la Formación el tamaño de grano se reduce mostrando calizas masivas mudstone intercaladas con lodolitas calcáreas estas últimas en mayor cantidad, esta parte debido a su tamaño de grano menor y su alta exposición es una zona muy meteorizada, a pesar de esa situación se alcanzan a observar bien los aloquímicos como restos de conchas, bivalvos, gasterópodos, braquiópodos. También se manifiesta recristalización de CaCO_3 y algunas estructuras como nódulos y concreciones (Apéndice 3).

Sección 3

La tercera sección fue levantada hacia la parte Norte del título, esta sección se tomó debido a que muestra el contacto entre la Formación Rosablanca y su formación suprayacente, Formación Paja (Fig. 49). Posee un espesor de 16.5 m y se tomó a través de una quebrada para de esta manera tener una mejor exposición de los cuerpos de roca.

En esta sección se produce un cambio notorio en comparación a las otras dos secciones, ya que el aporte terrígeno en esta parte es mucho mayor. La sección inicia con la presencia de un paquete de 50 cm de calizas tipo wackstone negras masiva con presencia de bivalvos y recristalización de CaCO_3 . A continuación a este nivel se presentan niveles de lodolitas calcáreas

negras con pequeños cuerpos de lodolitas terrígenas negras, estas últimas con un espesor aproximando de 30 – 50 cm. Por último, los cuerpos terrígenos aumentan en espesores presentando fisilidad y venas de tamaño moderado correspondientes al yeso de la Formación Paja, estas lodolitas oscuras se encuentran meteorizadas, presentan fisilidad, algunos nódulos y se encuentran intercaladas con calizas mudstone de espesores bajos entre 10 a 15 cm.

En esta sección se presenta el contacto entre la Formación Rosa Blanca y la Formación Paja que concordando con lo dicho por Julivert (1958) se trata de un contacto es neto (Apéndice 4).

profundidad, también se alcanzan a evidenciar en baja proporción cristales de dolomita, es importante recalcar que el aporte terrígeno en esta zona es casi nulo y que los cuarzos analizados en la muestras son de tipo autigenico, también hay presencia de pirita. Por la disposición del yeso en esta zona se puede indicar que fue precipitado en el momento de la formación de este nivel, con una gran importancia espacial en la zona.

Nivel Yeso : Este nivel con un espesor de 1.5 m está representado por el manto de mayor importancia para la explotación y se representa en un cuerpo en su totalidad yesífero compuesto de anhidrita y yeso este último en mayor cantidad, este nivel se cree que es la etapa donde las condiciones de hipersalinidad fueron las más óptimas.

Nivel de calizas mudstone con niveles evaporíticos altos y peloides: Este es un nivel muy parecido al nivel de los cuerpos algaceos, pero presenta una variación en cuanto al Aloquímicos que envuelve la roca, ya que en este caso se tratan de una gran cantidad de peloides los cuales siguen indicando un ambiente de poca profundidad. La presencia de anhidrita en estos niveles es alta, también hay presencia de dolomita, masa de micrita y pirita otro indicador más de que el ambiente de depósito es de tipo restringido y reductor.

Nivel Calizas intercaladas con Chert: Este nivel expone una sucesión de estratos calcáreos tipo Mudstone con intercalación de niveles de chert aproximadamente de 50 cm producto de procesos químicos (silicificación).

Los niveles anteriormente descritos facialmente se podrían agrupar en uno solo que sería el nivel de Calizas evaporíticas indicadoras importantes del tipo de ambiente en que se depositó esta parte de la Formación.

Nivel de calizas masivas: Este nivel está conformado por paquetes masivos de calizas que van desde mudstone y wackstone de coloraciones grises a grises oscuras, con presencia de bioclastos (bivalvos, gasterópodos, braquiópodos, restos de conchas y galerías), este nivel se caracteriza por la ausencia de estructuras físicas. Hacia el tope de este nivel el tamaño de grano de las calizas se aumenta presentando niveles de 50 cm aproximadamente de calizas tipo packstone con bioclastos muy similares a los de la parte baja y media del nivel, con la diferencia de que en este último hay presencia de ammonites.

Nivel lodolitas calcáreas intercaladas con calizas: Este nivel corresponde lodolitas calcáreas grises intercaladas con niveles de 30 cm aproximadamente de calizas tipo Mudstone, con presencia de Aloquímicos, algunas concreciones y precipitación de carbonatos representados en venas de calcita. Esta exposición tiene una alta meteorización.

Nivel margoso superior formado por calizas marrones, nodulosas alternando con margas; calizas y margas son bastante arenosas (Julivert, 1958).

Intercalación caliza, de caliza masiva hacia la base, que se hace margosa hacia el techo (Julivert, 1958).

Nivel de lodolitas calcáreas, lodolitas con intercalación de caliza: Este último nivel corresponde al tope de la Formación y puede evidenciar en el Apéndice 5 (columna del contacto). El nivel está representado por niveles de lodolitas tanto calcáreas como terrígenas intercaladas con pequeños niveles de calizas tipo mudstone. Este nivel tiene la particularidad de que los niveles terrígenos empiezan a ganar espacio sobre los calcáreos, evidenciando así la transición al cambio de ambiente.

7.2.2 Ambiente de depósito

A partir de los datos mostrados a lo largo de las secciones levantadas es posible deducir que la condiciones de sedimentación y depositación no fueron las mismas todo el tiempo si no que presentaron unas variaciones. La discontinuidad facial en el depósito de la Formación Rosa Blanca está marcada por los cambios de hipersalinidad y energía del medio.

Partiendo de la descripción de la parte basal de la formación analizada mediante secciones delgadas para obtener un mejor detalle en la descripción litológica podemos darnos cuenta que este tramo se caracteriza por una hipersalinidad y baja energía en el ambiente de depositación, es decir el medio era un medio tranquilo.

En este medio restringido y con propiedades óptimas para el desarrollo de niveles evaporíticos se produce la depositación de los niveles calcáreos yesíferos. Debido a que las condiciones para que se presenten estos niveles son muy restringidos se podría hablar de una barrera arrecifal, la cual daba el total aislamiento a las energías externas, sumado a esto el medio restringido tenía que ser rico en sales para dar lugar a la posterior precipitación de los niveles evaporíticos. La propuesta de una barrera arrecifal aunque no sustentada con presencia coralina si se puede sustentar con la presencia de cuerpos algáceos como se ven en las secciones delgadas los cuales viven en cercanías a estas barreras, en ambientes muy poco profundos. Los niveles yesíferos aunque depositados en el mismo medio hipersalino, poco profundo y tranquilo también presentan variaciones internas, esto se pudo observar mediante la petrografía donde se muestra que no todas las muestras presentan los mismos porcentajes de Yeso, partiendo de estos se puede deducir que Lajeo corresponde al periodo donde la Salinidad del medio fue mucho mayor en comparación con la de los otros mantos permitiendo la precipitación de una nivel en su totalidad

evaporítico. Una vez se produce la ruptura de este medio restringido se manifiestan de forma más clara las variaciones energéticas mencionadas al principio. Aunque la Formación Rosablanca se desarrolló en toda su extensión en un ambiente poco profundo de tipo nerítico las facies presentadas no son las mismas. Una vez se produce el rompimiento de este ambiente restringido la variación energética juega un papel importante en la depositación, se reconocen 3 niveles de alta energía, los cuales coinciden con la presencia de lúticos o aporte terrígeno. El primero de estos corresponde al nivel de calizas mudstone con presencia de aloquimos y lúticos en baja proporción, el segundo nivel de alta energía es en el que se deposita el nivel margoso superior formado por calizas marrones, nodulosas alternando con margas; calizas y margas son bastante arenosas (Julivert, 1958), y por último el nivel de lodolitas calcáreas, lodolitas con intercalación de caliza, cabe resaltar que los niveles de mayor energía son de mayor duración en comparación a los de tranquilidad (Zamarreño, 1963). El aporte terrígeno se podría explicar debido a que en el momento en que la Formación Rosa Blanca se está depositando también se está produciendo el levantamiento del macizo de Santander el cual aporta estos fragmentos.

La Formación Rosablanca posterior al nivel hipersalino se desarrolla en un ambiente de plataforma interna donde las profundidades son muy bajas.

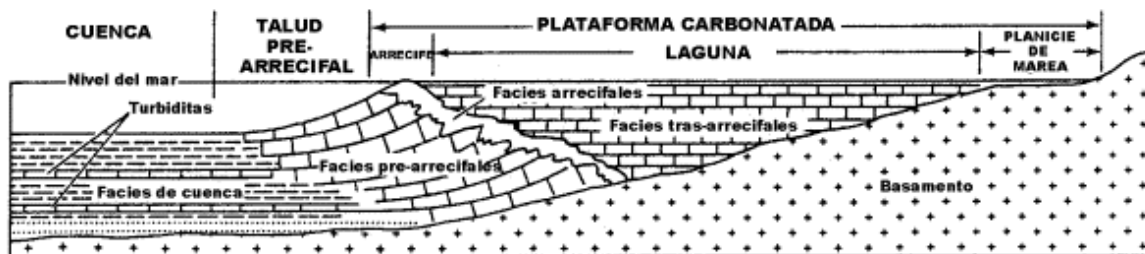


Figura 44. Esquema donde se ilustra el ambiente de desarrollo de la Formación Rosa Blanca. Tomado de gaia.geologia.uson.mx.

7.2.3 Modelo geológico de la mina

El yacimiento de yeso en la mina La Nacuma se ubica estratigráficamente en la parte basal de la Formación Rosablanca, “este nivel tiene un espesor promedio de 12 m, estando encima a 20 m del contacto infrayacente con la Formación Los Santos” (Vargas & Cruz, 1968. p. 5), donde los mantos se destacan por ser una intercalación de margas masivas oscuras con limolitas yesíferas con estratificación plano-paralela. En la mina:

Los estériles en el nivel de explotación son las capas de margas que van intercaladas con los mantos de yeso, con un espesor variable que oscilan entre 8 cm a 50 cm. Mientras que de los siete niveles yesíferos productivos dentro de los 12 metros del yacimiento, sólo se están explotando tres niveles que en orden de techo a base son la Churca, Lajeo y la Chaqueta. El primer nivel es Churca consta de dos mantos de yeso con un estéril de espesor promedio de 20 cm entre las dos capas; el primer manto de Churca tiene espesor que varía entre 40 – 50 cm y el segundo tiene un espesor aproximadamente de 1 m.

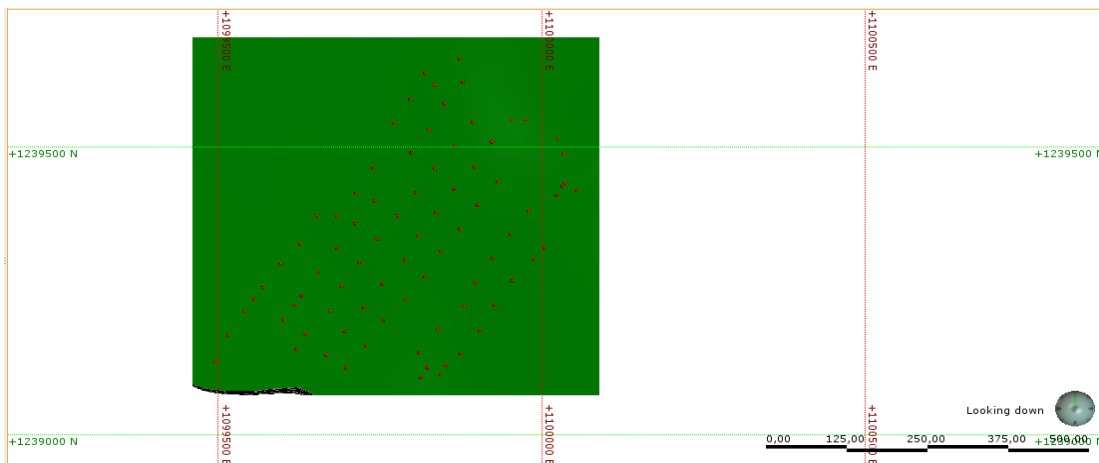


Figura 45. Vista superior del modelo geológico de la mina, donde se pueden observar los puntos donde se realizaron las estaciones para el levantamiento de columnas dentro de la mina. Estos puntos tienen la misma orientación SW, hacia dónde se inclinan las capas.

El siguiente nivel es Lajeo, que contiene el manto de mayor grosor de la secuencia del nivel yesífero de la Formación Rosablanca, cuenta con un espesor entre 1,30 a 1,63 m y sólo consta de una capa de yeso, siendo la de mejor explotación. El último nivel en explotación es la Chaqueta, que, así como la Churca, tiene dos mantos de yeso separadas por una capa de estéril de espesor promedio 8 cm, el primer manto de yeso de la Chaqueta tiene un espesor aproximado de 40 cm y el segundo manto de yeso tiene un espesor aproximado de 60 cm (Fig. 46).

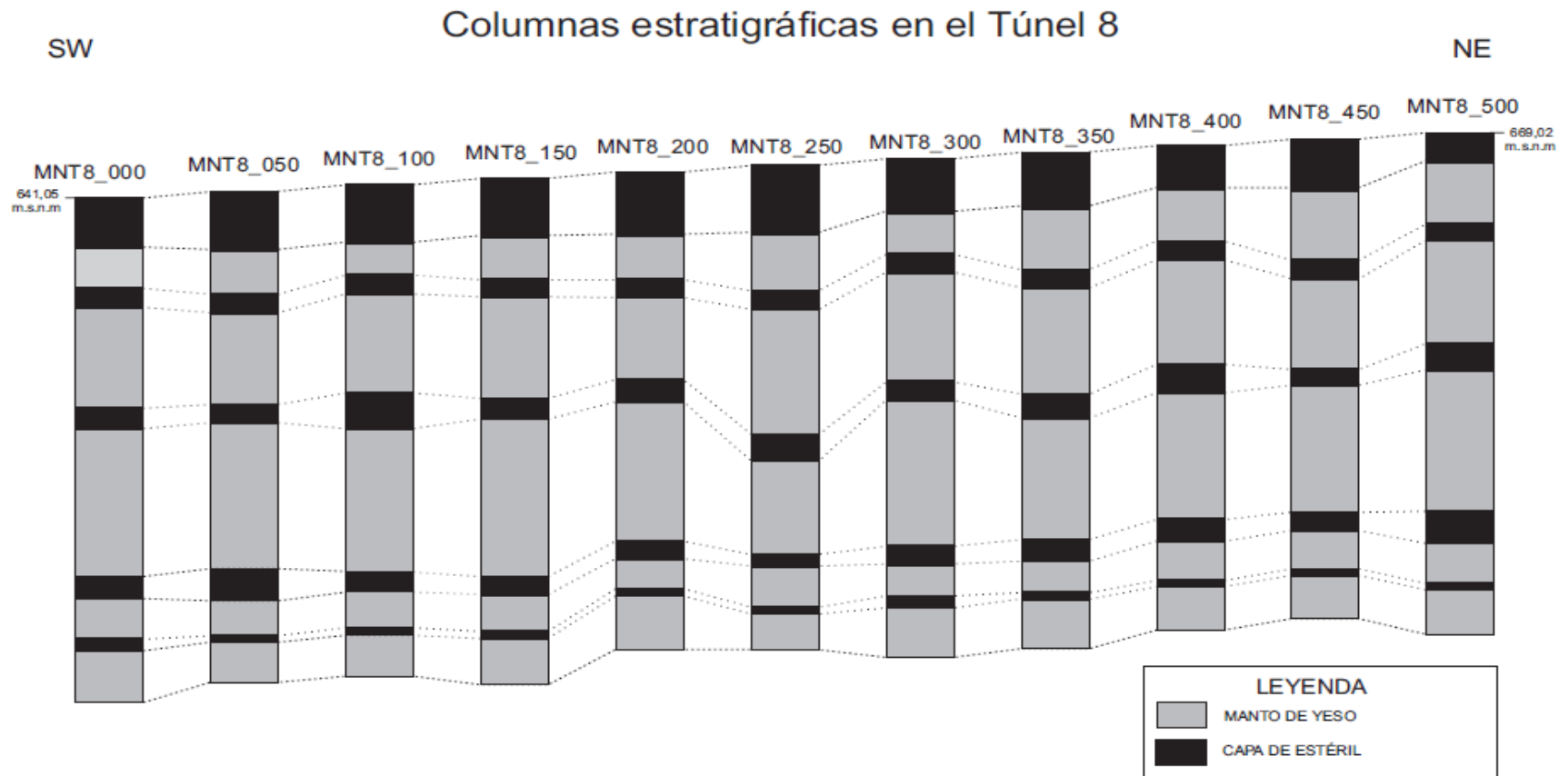


Figura 46. Correlación de espesores de las columnas levantadas a lo largo del túnel 8 de la mina, en dirección al buzamiento de la zona, donde se inclinan las capas hacia el SW.

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

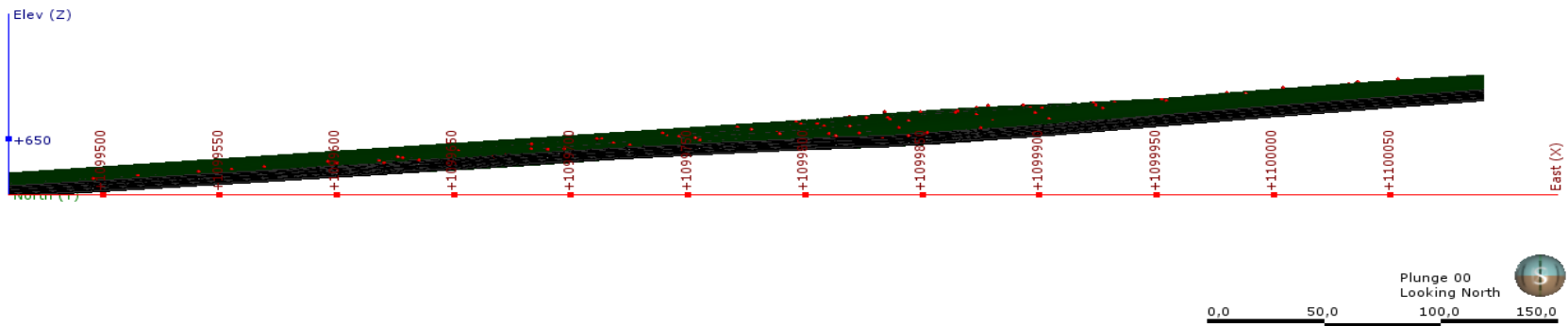


Figura 47. Vista N del modelo geológico donde se observa la inclinación hacia el W del yacimiento. Tomado de Leapfrog v. 4.0.

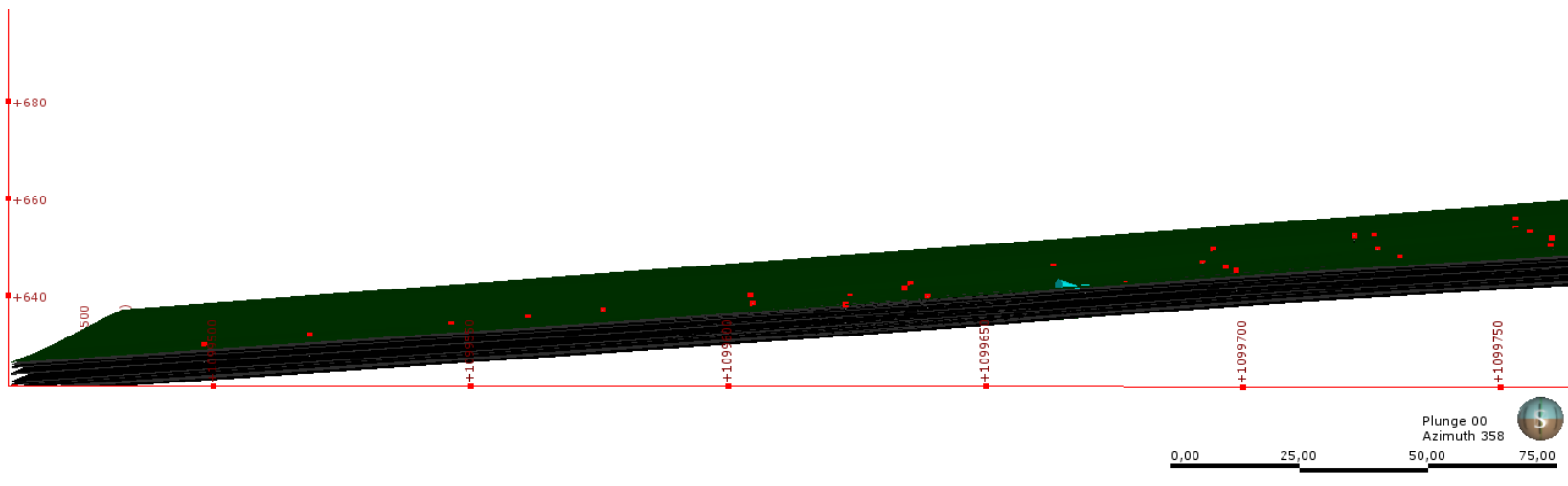


Figura 48. Vista N2W del modelo geológico. Tomado de Leapfrog v. 4.0.

Debajo del nivel de explotación se encuentran 3 mantos de explotación que de techo a base son La Dura, Cuero de Sapo y la Galleta, esta primera se encontró en algunos sectores de la mina La Nacuma, siendo una capa de yeso de 1 m aproximado de espesor y que la separa del manto de la Chaqueta un estéril de grosor aproximado 55 cm. Los mantos de Cuero de Sapo y la Galleta no fueron encontrados en este proyecto, debido a que no hacen parte de la explotación de la mina, por lo tanto, de acuerdo a la metodología que se manejó en campo, no se tomaron datos de estas capas ya que están enterradas. Un caso similar, es el manto la Pizarra, que tampoco está en explotación debido a que es el techo de la mina y para el sostenimiento de esta debido a que la litología suprayacente a este manto es muy blanda, no se explota esta, siendo así compleja la toma de datos en esta mina, de acuerdo a la metodología que siguió.

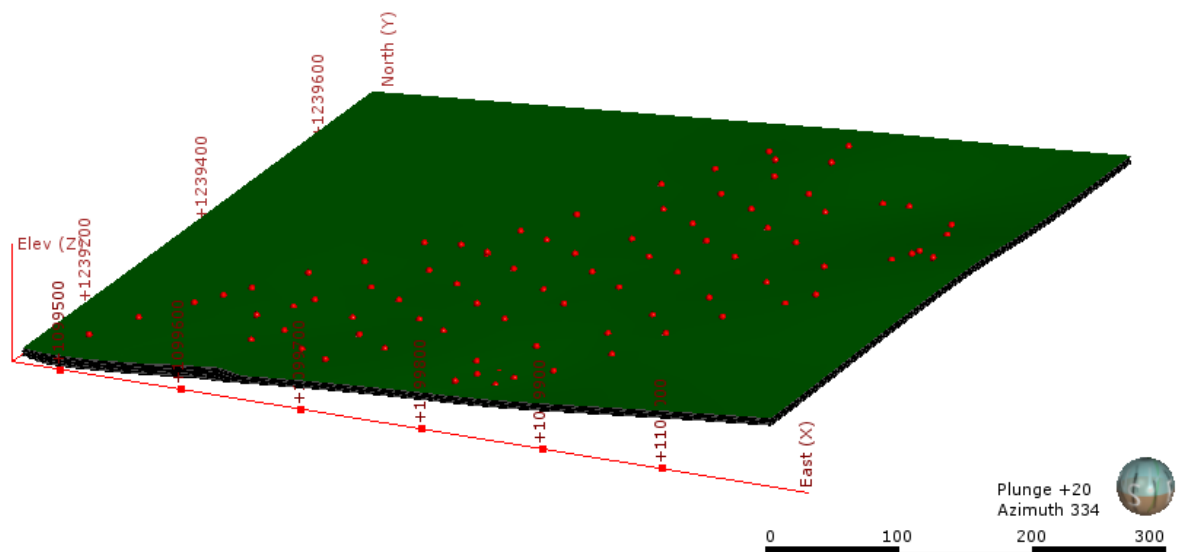


Figura 49. Vista inclinada desde el SE del modelo, donde se observa los puntos tomados en la mina con inclinados en dirección NE-SW. Esto indica que los túneles fueron construidos en dirección del buzamiento regional de las capas de la zona. Tomado de Leapfrog v.4.0.

En el modelo se puede observar la inclinación de la estratificación y la ausencia de estructuras como fallas y pliegues que afecte la disposición de las capas de los mantos de explotación. El buzamiento de las capas medido es de 6° con dirección SW, esto se evidencia en la vista desde el SE del modelo donde se ve la inclinación de las capas hacia el SW (Fig. 47,48 y 49) y la otra evidencia son los puntos de las estaciones levantados a lo largo de los túneles, mostrando que estos se construyeron siguiendo la inclinación regional de las capas (Fig. 46), con el objetivo que los mantos no se pierdan topográficamente, en el avance de los túneles de explotación del mineral.

7.3 Geoquímica de la mina

Para la industria del cemento la concentración de SO_3 (trióxido de azufre) en los mantos yesíferos es el parámetro que permite determinar la calidad de estas rocas.

Se tomaron 145 muestras de cada manto productivo para el análisis químico y de acuerdo a sus concentraciones, se establecieron rangos en función a la calidad del porcentaje de SO_3 , con el fin de identificar los mantos de mejor concentración y caracterizar las zonas donde se encuentran dentro de la mina con el mejor potencial productivo para la explotación de este mineral.

Los resultados en el análisis químico de espectrometría de fluorescencia de Rayos X arrojaron porcentajes buenos de calidad para la explotación y aprovechamiento de este mineral, la muestra con el mayor porcentaje de SO_3 fue de 45,36% y la de menor dato fue de 18,31%, resultando un porcentaje promedio general de la mina de SO_3 de 35,02%, situándose encima del porcentaje mínimo óptimo y el porcentaje mínimo de producción (Tabla 6).

Tabla 6.

Valores generales de los porcentajes de SO₃ arrojados por los análisis químicos de Laboratorios comparados con porcentajes de calidad.

Observación	% SO ₃
Dato menor	18,31
Dato mayor	45,36
Promedio Concentración de SO ₃	35,02
% de SO ₃ mínimo útil para la producción de cemento	30
Porcentaje mínimo Óptimo	33

Tabla 7.

Rango de los porcentajes de concentración de SO₃ que se tuvo en cuenta para el mapa de isócronas de la mina.

# Rango	Descripción	Rango	Número de datos	Densidad de datos
1er rango	Bajo % de SO ₃	$x < 30$	14	16,09%
2do rango	% Óptimo de SO ₃	$30 \leq X < 33$	26	29,89%
3er rango	% Muy bueno de SO ₃	$33 \leq X < 40$	25	28,74%
4to rango	% alto de SO ₂	$40 \leq X < 43$	15	17,24%
5to rango	% muy alto de SO ₃	$43 \leq X$	7	8,05%
Total datos			87	1

Tabla 8.

Escala de porcentajes de SO₃ y el número de muestras tomadas en cada manto productivo de la mina.

Manto	Escala de valores	# de Datos
Concentración de SO ₃ en Primer manto de Churca	30,98 - 43,28	29
Concentración de SO ₃ en Segundo manto de Churca	24,57 - 38,18	29
Concentración de SO ₃ en Lajeo	31,84 - 45,36	29
Concentración de SO ₃ Primer manto Chaqueta	22,48 - 42,47	29
Concentración de SO ₃ Segundo manto Chaqueta	18,31 - 34,76	29

7.3.1 Análisis de la química en los niveles yesíferos

El manto Lajeo fue considerado el de mejor concentración de SO₃ con un porcentaje promedio de 41%, en la Tabla 8 y la Fig. 56, se puede observar la tendencia de los datos en este manto es del rango Óptimo a de muy alta calidad de SO₃ (Fig. 50), los valores varían desde 31,84 a 45,36 %, este último la mayor anomalía de SO₃ que fueron arrojados en este estudio, incluso el dato de menor porcentaje es de una calidad considerable dentro de los parámetros de los rangos hecho, aunque se deben resaltar las estaciones MNF_3, MNT_400, MNF_11, MNF12 Y MNT_020 donde están los datos de menor calidad en este manto. En el mapa de concentraciones de Lajeo (Fig. 51) se observa que los valores de mayor anomalía, altos y muy altos de SO₃, son muy uniformes y distribuidos en casi toda el área de la mina, salvo las estaciones donde están los yesos de calidad muy buena y óptima que ya han sido mencionadas. Por su potencial productivo este es el manto predilecto en la explotación de yeso en esta mina, teniendo en cuenta también, que es el de espesor más significativo de la secuencia.



Figura 50. Tendencia de las concentraciones de SO3 en el manto de Lajeo en cada estación realizada dentro de la mina.

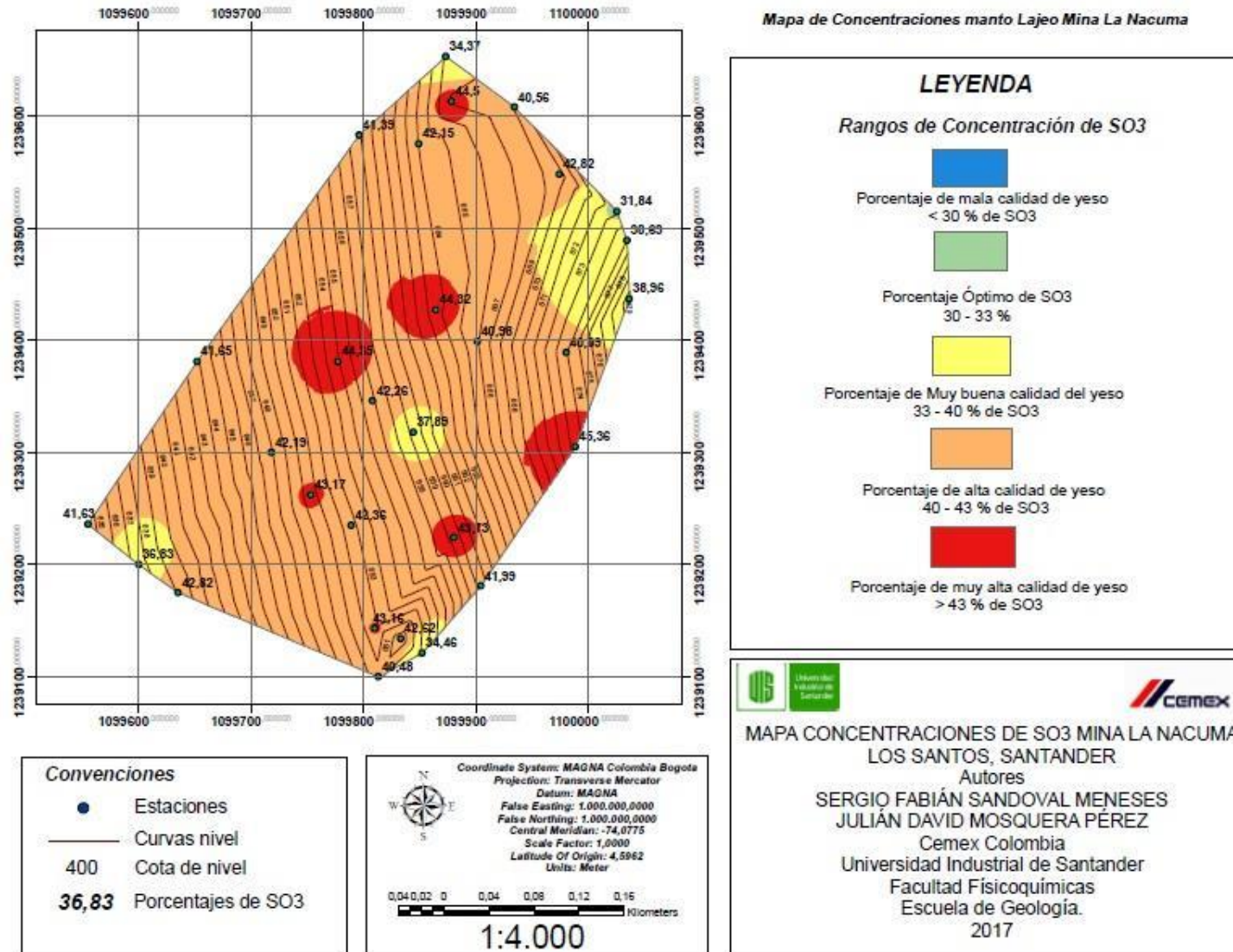


Figura 51. Mapa de concentraciones de SO3 del nivel Lajeo.

El nivel Churca presenta dos mantos de yeso, siendo el primer manto de este nivel el de mejor porcentaje de calidad con valor promedio de 38,15% de SO₃ y el segundo manto con menor porcentaje que el primero de este nivel yesífero presenta un porcentaje promedio de 30,07% de SO₃. El primer manto de este nivel es de mejor calidad de yeso que el segundo, donde la tendencia está de un rango Óptimo a alto de calidad (Fig. 52 y 54), con una anomalía de 43,29% de muy alta de calidad en el frente de avance del túnel 9 (MNF_9) y la anomalía menor dio 30,98% de SO₃ (MNT2_125), teniendo en cuenta la Tabla 7, el porcentaje de calidad en esta estación es óptimo y considerable para la explotación del yeso. En el mapa de isócronas de la Fig. 58, observamos una uniformidad de porcentajes de muy buena calidad del yeso, con una zona muy local de calidad Óptima hacia el SW de la mina y algunas zonas de alta calidad hacia el N de la mina con otras muy locales hacia el SE, esto indica que este manto aporta muy buena calidad en la explotación del nivel yesífero de la Churca.

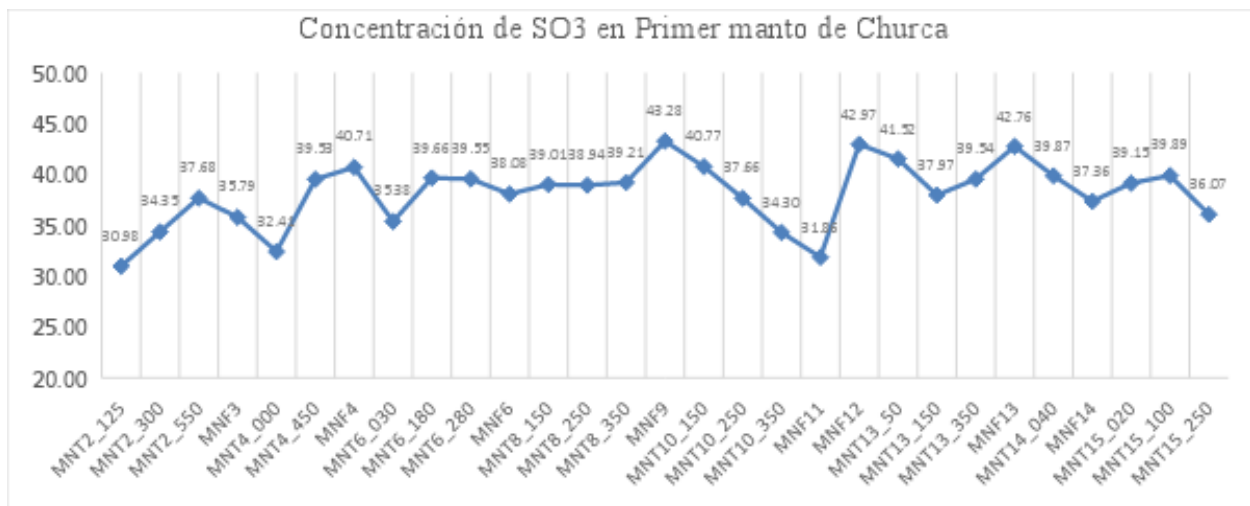


Figura 52. Tendencia de las concentraciones de SO₃ en el Primer manto de Churca en cada estación realizada dentro de la mina.

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

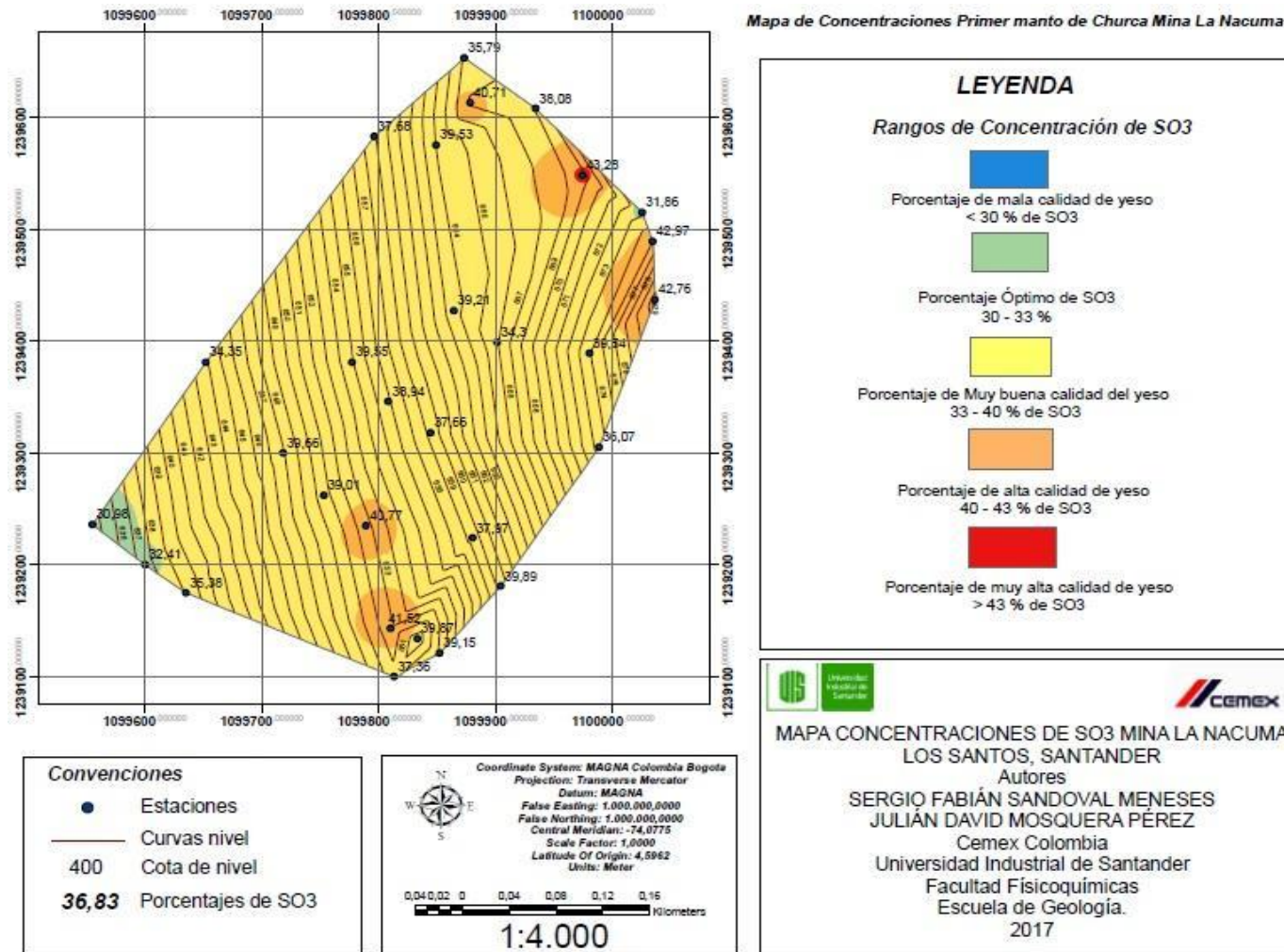


Figura 53. Mapa de concentraciones de SO3 primer manto del nivel yesífero Churca.

El segundo manto de Churca como se observa en la Figura, su calidad es menor que el primer manto de este nivel, su promedio de porcentaje de SO₃ de 30,07%, a pesar de que este valor es de calidad considerable, la tendencia de esta capa oscila entre los rangos de mala a óptima calidad (Fig. 60 y Fig. 61) y no se observan anomalías de alta a muy alta calidad, siendo el dato mayor con un porcentaje de 38,18% de SO₃ que se encuentra en el rango de muy buena calidad. En el mapa isócronas (Fig. 61) se contempla que las zonas de menor concentración de este manto están hacia el S de la mina cerca de las bocaminas y en una zona muy local hacia el NE, hacia el N de la mina se observa la calidad del SO₃ es óptima, con algunas zonas locales de muy buena calidad. A pesar de la tendencia de las concentraciones de SO₃, el segundo manto de Churca tiene un espesor muy importante para la explotación del yeso aportando mucho material para la producción de yeso.

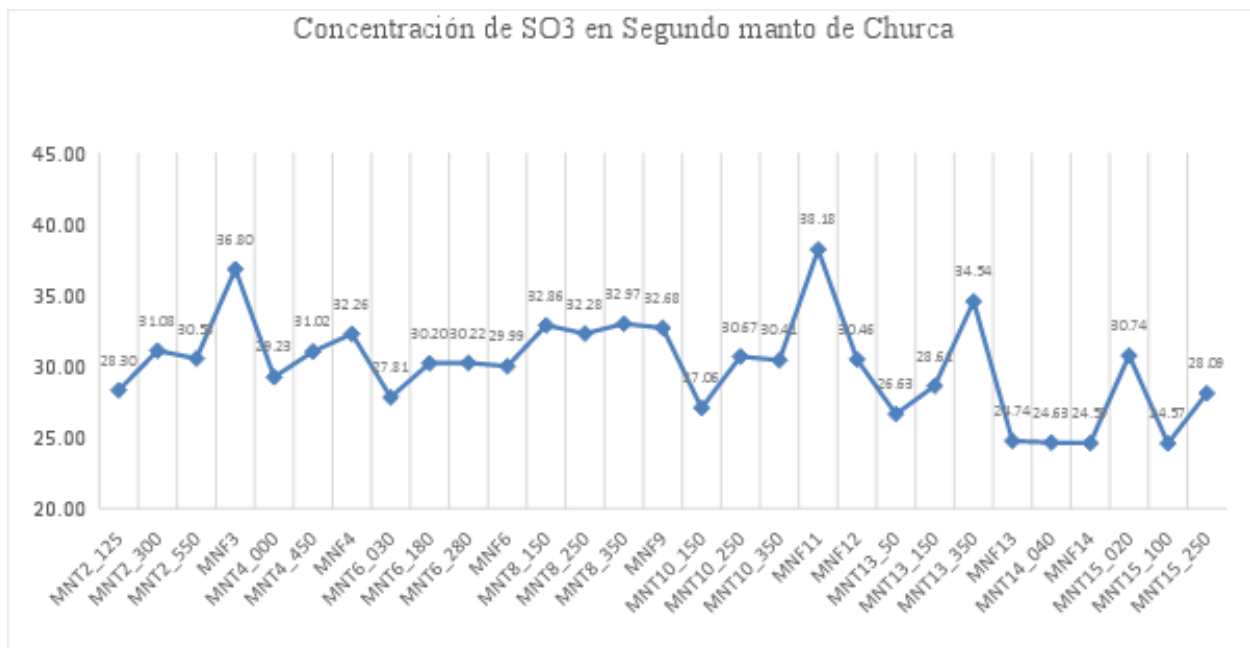
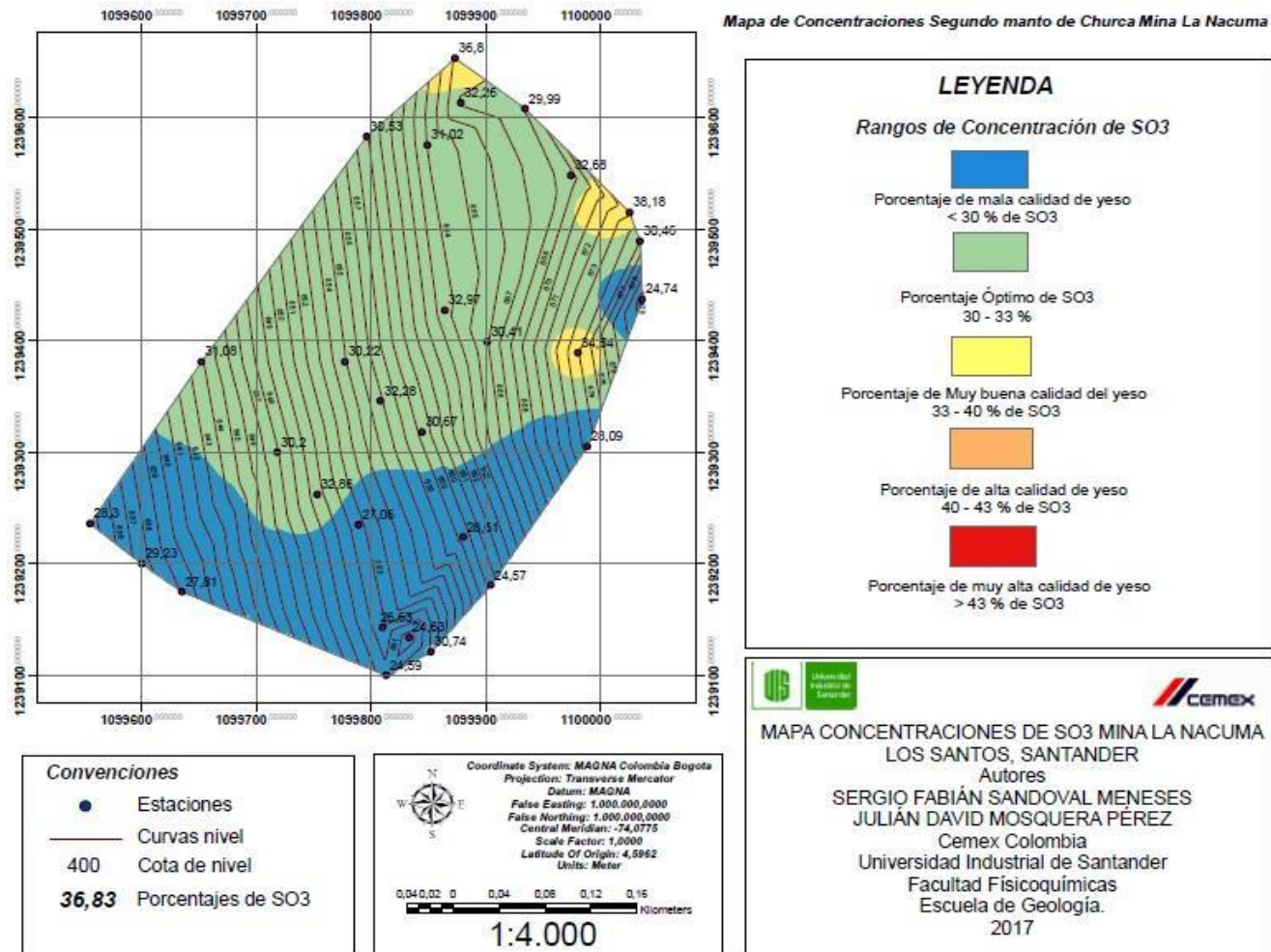


Figura 54. Tendencia de las concentraciones de SO₃ en el Segundo manto de Churca en cada estación realizada dentro de la mina.

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D



El nivel Chaqueta es el de menor concentración si tenemos en cuenta los porcentajes promedio de las capas que la conforman, el primer manto de Chaqueta es el de mejor porcentaje de SO₃ con un promedio de 36,06% y el segundo manto de este nivel es el de menor concentración de esta secuencia en explotación con 29,86%. Considerando la tendencia del primer manto de este nivel (Fig. 56), se observa valores que están dispuestos entre los rangos de alto a óptima calidad, con dos anomalías que se encuentran debajo del 30% de SO₃ (rango de mala calidad). En el mapa de concentraciones (Fig. 63) se observa una uniformidad de colores en el rango de muy buena calidad donde la densidad de datos está entre 33,13% a 39,22% de SO₃ en este manto. Los datos de menor calidad se encuentran sólo hacia el NE de la mina donde se encuentran las dos anomalías de baja calidad de yeso.

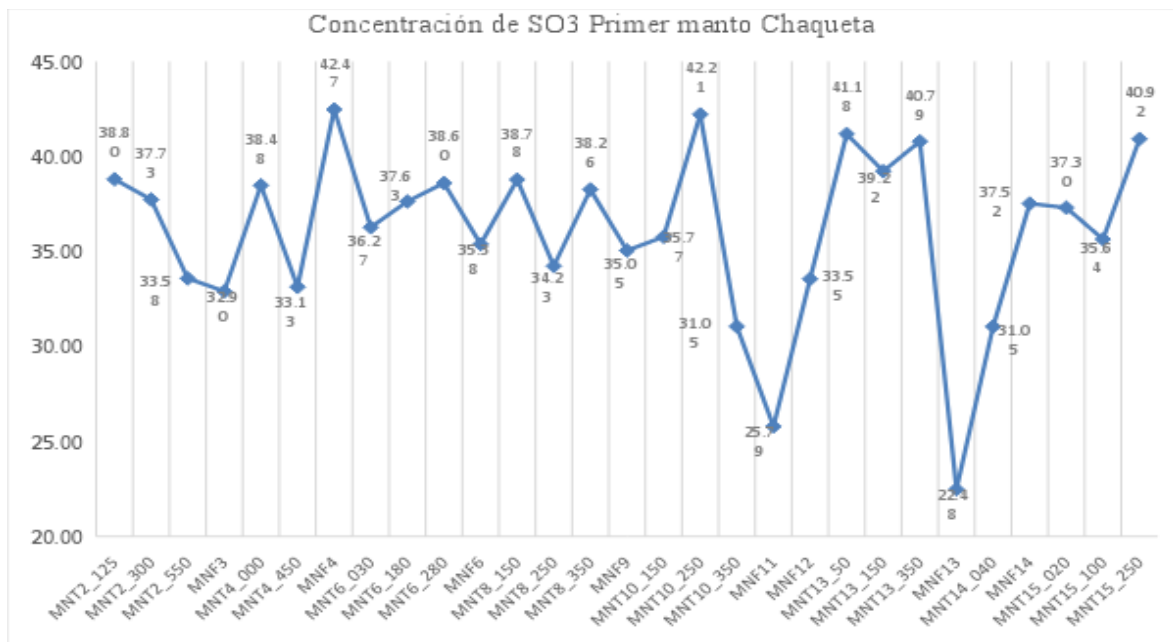


Figura 56. Tendencia de las concentraciones de SO₃ en el Primer manto de Chaqueta en cada estación realizada dentro de la mina.

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

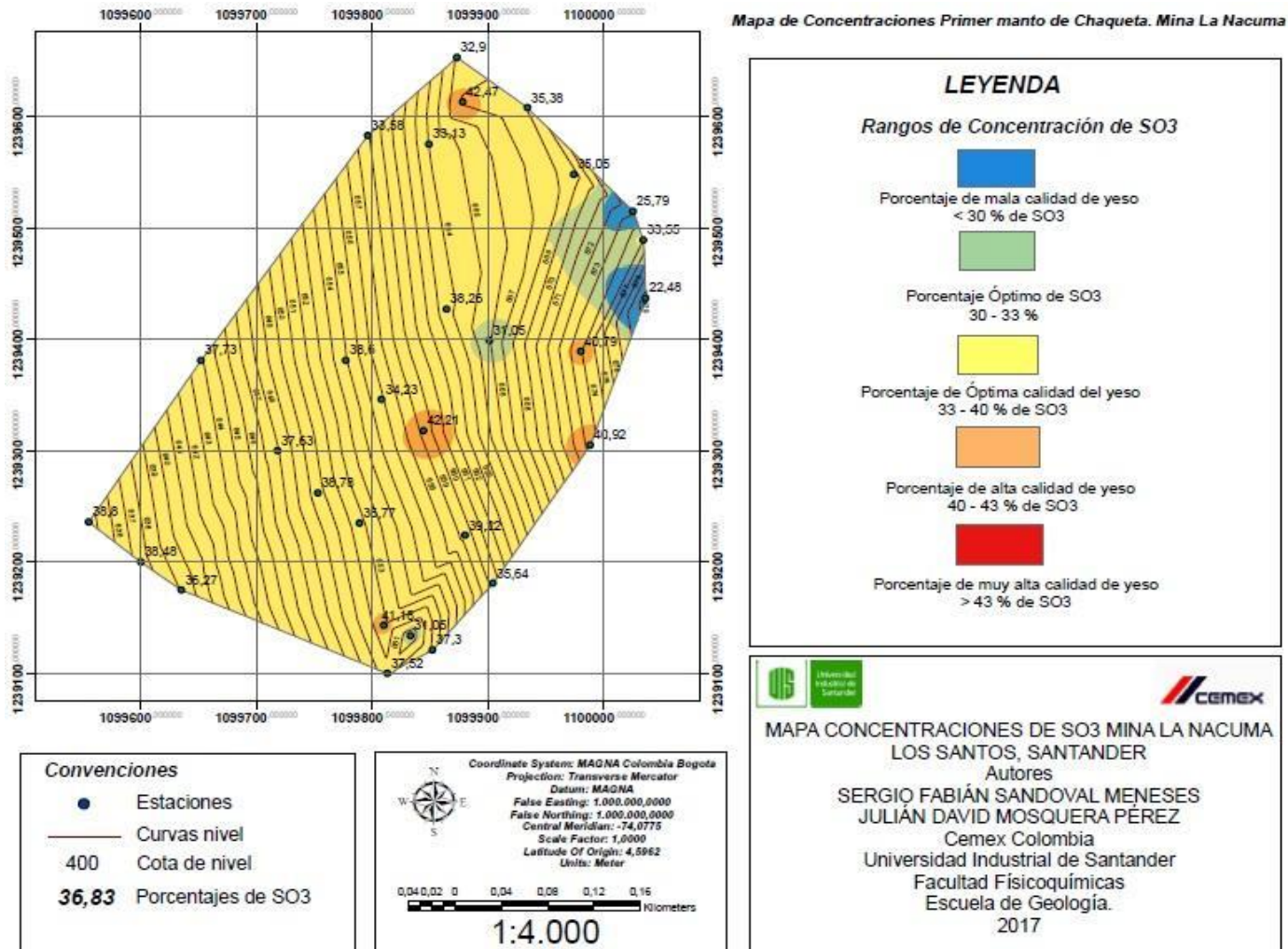


Figura 57. Mapa de Concentraciones de SO3 Primer manto del nivel yesífero Chaqueta.

La tendencia de las concentraciones en el segundo manto de Chaqueta está entre los rangos de Óptima calidad a mala calidad (Fig. 58 y Fig. 59), presentando anomalías en las estaciones MNT4_450, MNF4, MNT8_250, MNF11, MNT13_350 y MNT15_250, de muy buena calidad, con ausencia de datos de alta a muy alta calidad mayores de 40% de SO₃. En este manto se encuentra el dato de menor porcentaje de SO₃ de todo el estudio químico que se hizo en caracterización de la mina, situándose en la estación MNT_400 con un valor de 18,31%. En el mapa de isócronas (Fig. 59) se observa que los datos de menor concentración de SO₃ están en el S hacia la bocamina y en algunas zonas locales hacia el N de la mina, destacándose más en el NE. A pesar de que hay muchos datos dentro de los con porcentajes óptimos de calidad, este manto se destaca por sus concentraciones de mala calidad, que pueden los valores de SO₃ en todo el nivel yesífero en el momento que se realicen la explotación de este.

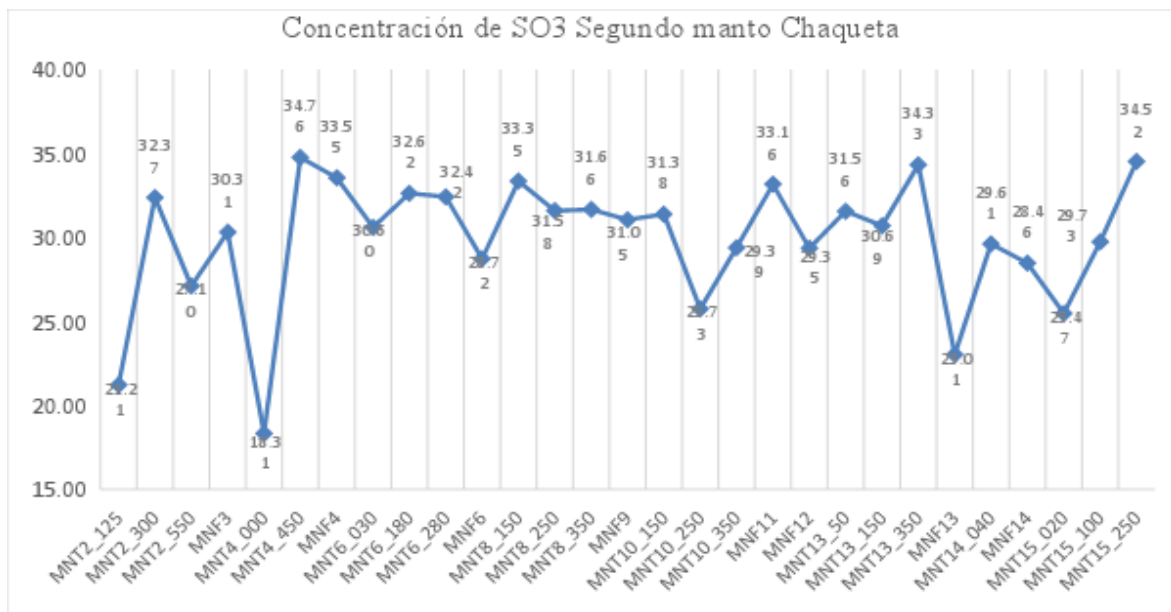


Figura 58. Tendencia de las concentraciones de SO3 en el Segundo manto de Chaqueta en cada estación realizada dentro de la mina.

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

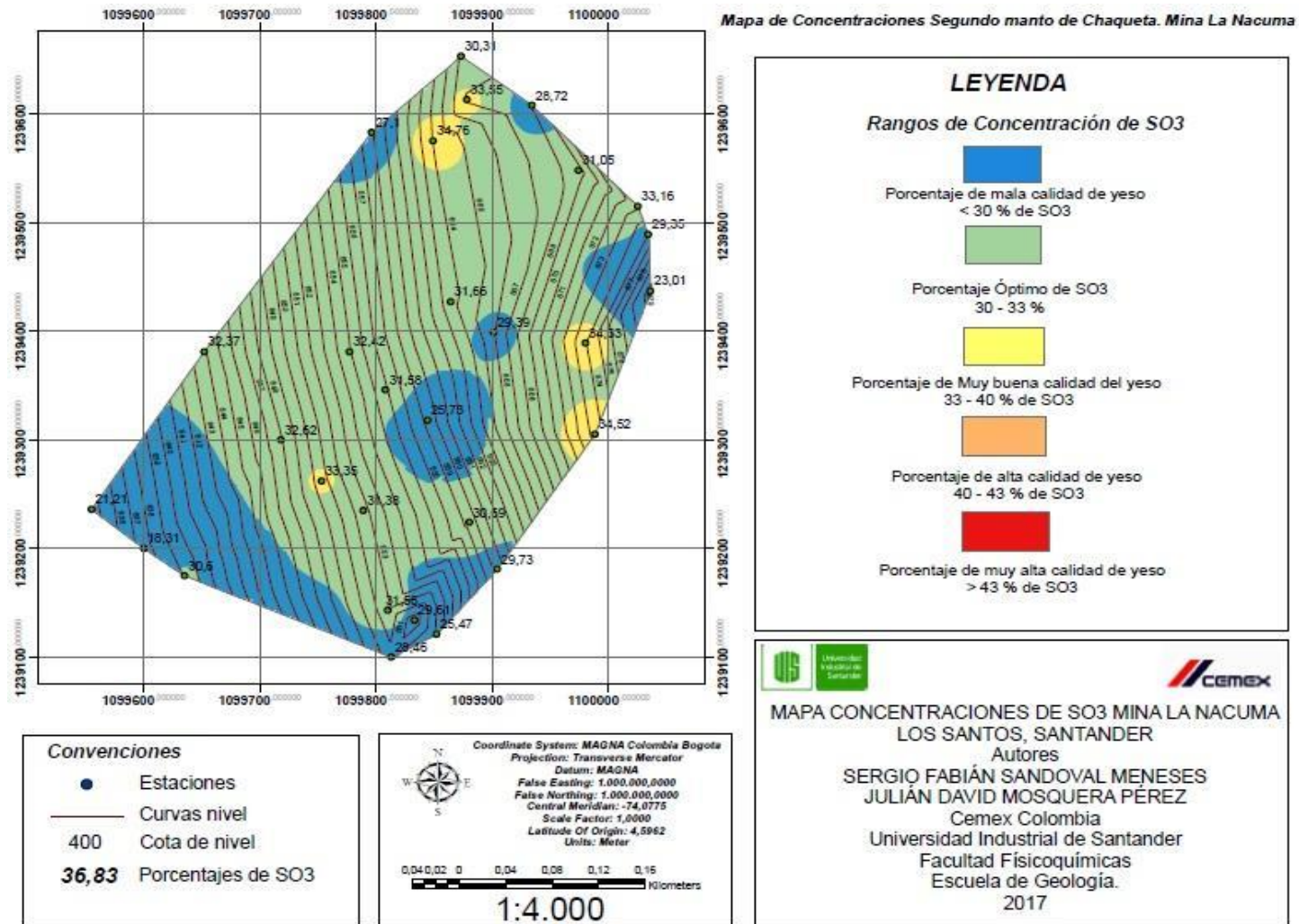


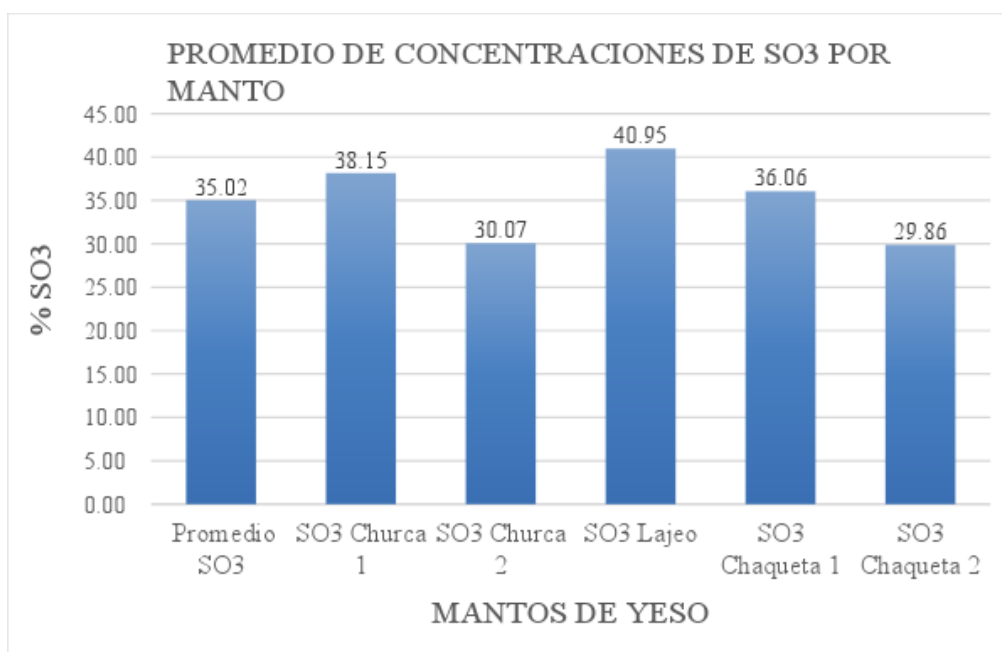
Figura 59. Mapa de Concentraciones de SO3 Segundo manto del nivel yesífero Chaqueta.

7.3.2. Evaluación general del potencial de yeso en la mina

Con respecto a los análisis químicos de las muestras de cada manto, se definió que estos tienen un buen potencial productivo para su aprovechamiento en la industria del cemento, determinándose las zonas donde se encuentran las concentraciones de mejor calidad dentro del área de explotación de la mina por medio del mapa de isócronas a escala 1:4000. Se obtuvieron los promedios de concentraciones de SO_3 en cada manto, para tomarlos como un parámetro general, con el fin de deducir la calidad de los mantos de yesos y comparar esos valores. Como se muestra en la Tabla 9, que el manto de Lajeo es el de mejor calidad con un porcentaje promedio 40,95% y el de menor calidad el segundo de manto de Chaqueta con 29,86%, encontrándose por debajo del 30% porcentaje mínimo de calidad.

Tabla 9.

Promedio de las concentraciones de SO_3 en cada manto de explotación de la mina.



CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

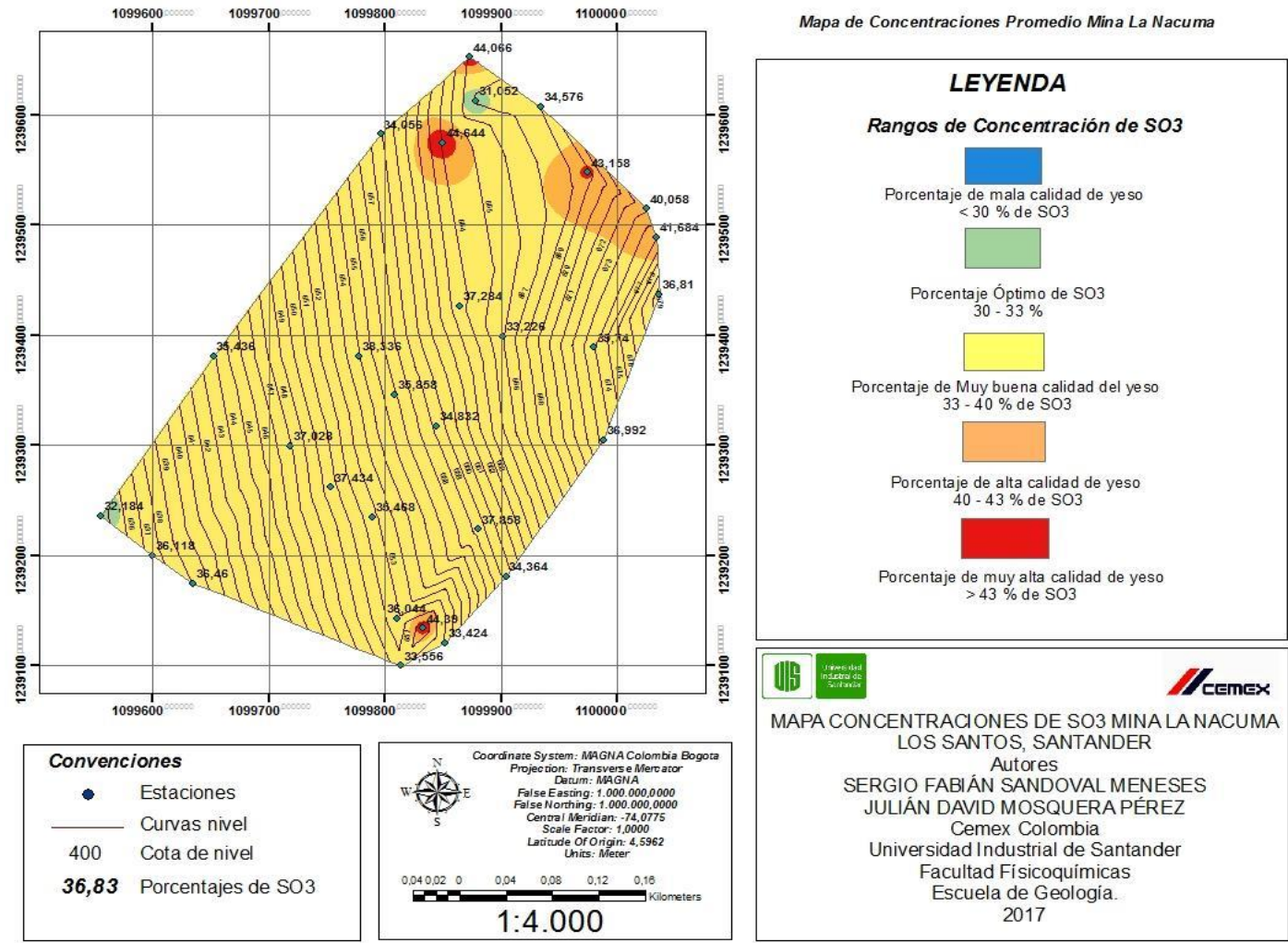


Figura 60. Mapa de Concentraciones Promedio de SO3 en el área de la mina.

Con los criterios de explotación de un yacimiento de yeso (ver concepto en el Capítulo 4.5.6.) en este estudio, se identificaron condiciones de calidad, cantidad, estructura geológica del yacimiento y características de las capas, de acuerdo a los resultados obtenidos en este proyecto.

La elaboración de los mapas de concentración de SO_3 y el análisis de la tendencia de los datos mostrados en el análisis químico de los mantos, se determinó que los niveles productivos de yeso de la mina La Nacuma tienen porcentajes de calidad muy buenos de calidad de SO_3 (Fig. 60).

La disposición espacial del yacimiento, que consiste en estratos sub-horizontales con ligera inclinación 6° dirección SW y continuos con algunas variaciones de espesores, se puede definir una relación entre el volumen y concentración, para la evaluación de potencial de yeso en las columnas de soporte y en los frentes de avance donde se tomaron las muestras, deduciendo que las condiciones de las características de las capas, las estructuras geológicas y cantidad en el yacimiento son muy buenas para la explotación de yeso.

Por el anterior diagnóstico, se establece la relación de Espesor de la columna vs Concentración de SO_3 (Tabla 9), teniendo en cuenta que se puede inferir la dimensión del volumen de yeso que se encuentra en la estación con respecto con el espesor en cada estación, vinculando que entre más volumen de roca de yeso y mejor concentración de SO_3 , el potencial en esa estación es mejor. Según la Fig. 61 y con la interpretación anterior de las relaciones espesores vs % de concentración, en el caso que coincidan los picos altos en una misma estación, se determina que esta es de muy buen potencial de yeso. También hay que destacar cuando las gráficas coinciden en tener picos bajos, siendo así que son las estaciones con menor potencial yesífero. La gráfica muestra que las estaciones MNF4, MNT6_280, MNT8_150, MNF9 y MNT13_350 tienen el mejor potencial en la mina, dado que las columnas tienen espesores significativos con muy buenos porcentajes de SO_3 y con espesor de muy buena longitud, y siguiendo con el mismo

parámetro de interpretación las estaciones de menor potencial MNF11, MNF13, MNT10_350, MNT15_020 y MNT2_550, debido a que presentan los picos más bajos.

7.3.3 Análisis químico en zonas externas a los mantos productivos

Hacia el Sur de la mina, entre los túneles 2 y 4, se encontró expuesto el nivel La Dura, debido a la explotación que se había hecho anteriormente en este manto yesífero. Los yesos en el manto La Dura tienen un promedio de 32,28 % de SO_3 , si tenemos en cuenta la tabla de los rangos de calidad (Tabla 7 y 10), pese a que en algunas estaciones puede presentar baja concentración de yeso, debido a efectos de meteorización que atacan a la roca manto. Químicamente, este manto tiene valores que varía entre los rangos de mala a muy buena calidad (Tabla 10) y por su espesor que varía entre 0,82 a 1,28 metros, se infiere que La Dura tiene un buen potencial de productividad de yeso.

Tabla 10.

Porcentajes de concentración de SO_3 en el manto del nivel La Dura.

Frente / Túnel	Metros dentro del túnel	Observaciones	SO_3 [%]	Espesor
2	0 m (Bocamina)	Manto La Dura	37,6	1,03
2	50 m	Manto La Dura	30,9	1,08
2	100 m	Manto La Dura	36,47	1,04
2	125m	Manto La Dura	22,49	1,28
4	0 m	Manto La Dura	32,33	1,15
4	32 m	Manto La Dura	26,79	1,16
4	50 m	Manto La Dura	39,41	0,82
Promedio Muestras Manto La Dura			32,28	1,08

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO GEOLÓGICO 3D

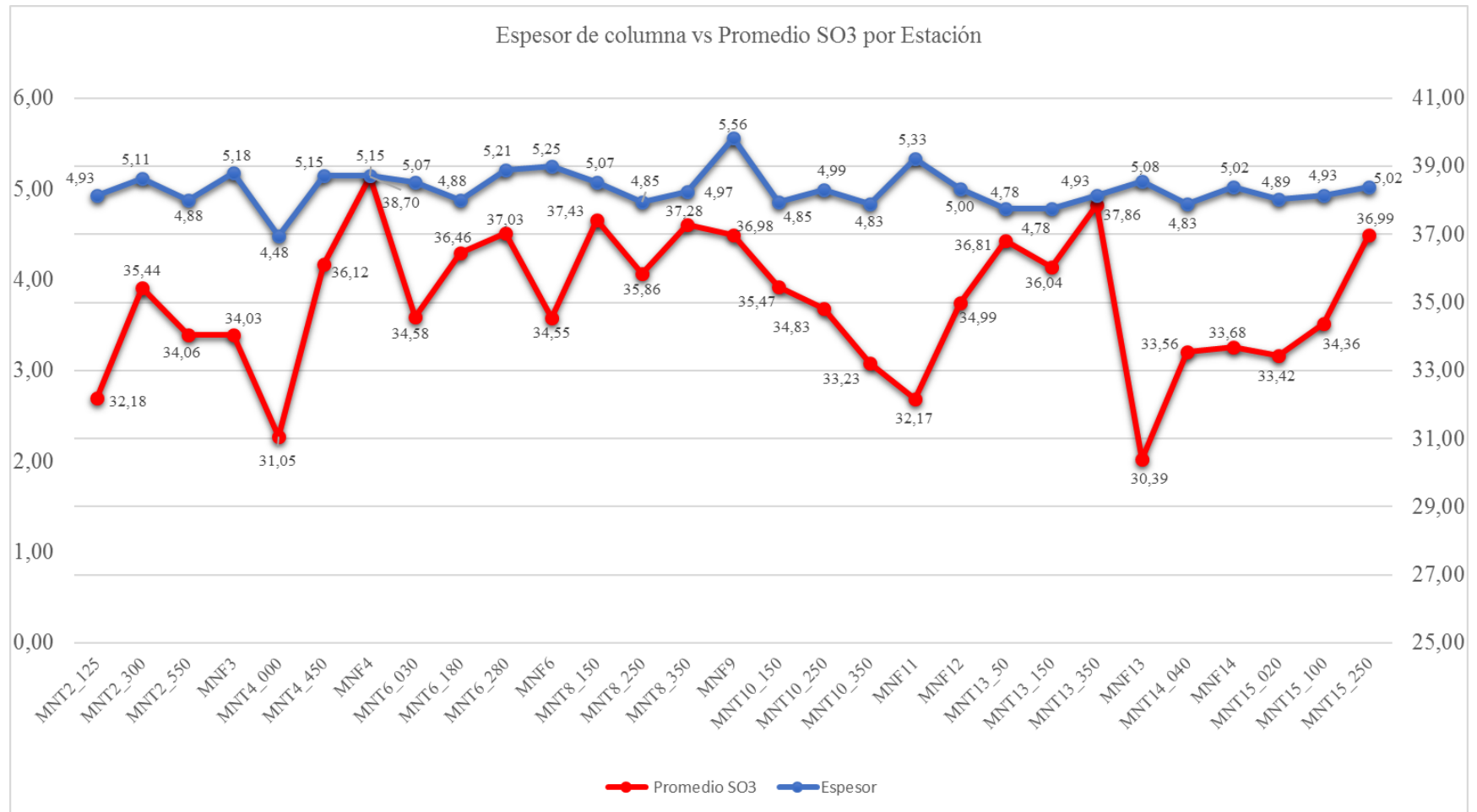


Figura 61. Relación entre los espesores de las columnas y el promedio de concentración de SO3 de cada estación donde se tomaron las muestras dentro de la mina.

Hacia la base de la Formación Paja se encontraron capas de shales oscuras muy físis con láminas de yeso paralelas al plano de fisilidad. Se tomaron muestras en estas capas para evaluar el contenido de SO_3 , con el fin de analizar si estas capas podrían tener indicadores de calidad, para interpretar si estos mantos tienen las propiedades químicas para ser mantos de yeso. Según la química de las muestras que se tomaron en estas capas, se determinó estas capas de la Formación Paja, no tiene los suficientes valores de calidad para ser mantos productivos de yeso (Tabla 11), ya que los valores varían entre el 7,44% a 8,75% de SO_3 en su composición química.

Tabla 11.

Valores de los porcentajes de SO_3 de las capas de yeso con laminaciones de yeso en la Formación Paja.

Muestras	SO_3	Observaciones
MPP-01	8,42	Nivel 1 de la Formación Paja de Base a Techo
MFP - 02	7,44	Nivel 2 de la Formación Paja de Base a Techo
MPP-03	8,75	Nivel 3 de la Formación Paja de Base a Techo
MFP - 04	7,97	Nivel 4 de la Formación Paja de Base a Techo
PROMEDIO	8,145	Baja calidad

8. Conclusiones

El yacimiento de la mina La Nacuma, consiste en una secuencia de siete niveles yesíferos con espesor 12 m, que se encuentran hacia la base de la Formación Rosablanca la cual se comprende de intercalación de calizas Mudstone con alto contenido de materia orgánica, formadas en un ambiente sedimentario favorable a la mineralización evaporítica, en su disposición espacial comprende de estratos continuos sub-horizontales con ligera inclinación 6° dirección SW y con algunas variaciones de espesores.

La Formación Rosablanca se caracteriza por ser una secuencia calcárea la cual presenta variaciones en sus niveles a lo largo de su sección; esto se debe a que su depositación no fue desarrollada en un solo tipo de ambiente si no que a pesar de que siempre se mantuvo en un ambiente marino somero, presenta variaciones salinas y de energía. Estas diferencias se representan a lo largo de la sección con la exposición de diferentes facies que van desde Calizas mudstone con intercalación de rocas evaporíticas, calizas mudstone intercaladas con lodolitas calcareas, paquetes de calizas masivas de tamaño de grano más grueso como wackstone y packstone, Lodolitas calcáreas intercaladas con capas menores de wackstone y finalmente Lodolitas calcáreas con intercalación de lodolitas terrígenas.

La importancia de Rosablanca se centró en la parte basal donde se encuentran los niveles yesíferos de la mina La Nacuma, que se depositaron en un ambiente cerrado dominado por hipersalinidad y baja energía, este ambiente puede tratarse de una barrera arrecifal, por la evidencia encontrada en la petrografía donde se pueden observar niveles biolitos y pelitos. (Chaqueta, Lajeo, Churca). Este nivel presenta la característica de cuerpos algaceos y pelíticos.

Los niveles yesíferos que se estudiaron son los que están en explotación en la mina La Nacuma, que en orden de techo a base fueron denominados informalmente la Churca, Lajeo y la Chaqueta. Los espesores de las columnas de la secuencia de los niveles productivos de yeso en la mina varían entre 4,61 m y 6,83 m, con espesor promedio de 5,13 m. Con respecto a los mantos de yeso (rocas evaporíticas), estos tienen espesores muy significativos que varían 40 cm a 1.63 m y están intercalados con capas de estériles (calizas Mudstone) con espesores que oscilan entre 8 cm a 50 cm., siendo el manto Lajeo el de mejor espesor que oscila entre 1,30 m y 1,63 m, y el de menor espesor es el primer manto de la Chaqueta que es aproximadamente 40 cm.

Con base al muestreo y los análisis químicos de los mantos productivos, se definió que, los porcentajes concentraciones de SO₃ en la mina de La Nacuma son de muy buena calidad para la explotación de yeso en la industria cementera. El manto del nivel Lajeo fue considerado el de mejor concentración de SO₃ con un porcentaje promedio de 40,95% de SO₃, con tendencia a estar entre los rangos de Óptima a de muy alta calidad de SO₃, contrario al segundo manto del nivel Chaqueta que está entre los rangos de Óptima calidad a mala calidad con promedio de 29,86% de SO₃ (Tabla 12). A raíz, de la relación espesor del manto con la calidad de los yesos, se concluye que el manto Lajeo es el manto con el mejor potencial.

Tabla 12.

Proporción de CaCO_3 y arcilla (incorporada junto con el carbonato de calcio) que guarden las rocas.

MANTO	Rango de valores % de SO_3	Promedio % de SO_3	Valores de SO_3 %. Sección delgada
Concentración de SO_3 en Primer manto de Churca	30,98 - 43,28	38,15	40
Concentración de SO_3 en Segundo manto de Churca	24,57 - 38,18	30,07	53
Concentración de SO_3 en Lajeo	31,84 - 45,36	40,95	94
Concentración de SO_3 Primer manto Chaqueta	22,48 - 42,47	36,06	72
Concentración de SO_3 Segundo manto Chaqueta	18,31 - 34,76	29,86	53

En el área alrededor de La Nacuma, no se encontraron estructuras que evidenciaran rasgos tectónicos mayores, esto se refleja por la ausencia de plegamiento de las capas y la baja inclinación del buzamiento de las capas, indicando que son capas sub-horizontales y que van en el mismo sentido con la topografía de la zona.

9. Recomendaciones

Realizar un estudio hidrogeológico, con el fin de controlar los flujos de agua dentro de la mina, si afectan a los mantos productivos y relacionándolas con las zonas de baja de concentración de SO_3 .

Llevar a cabo, estudios similares en las otras minas de la empresa, con el fin de identificar las calidades de los minerales de interés.

Mejorar el acceso a la zona, mediante el mantenimiento periódico de las vías o la creación de nuevas vías de comunicación.

Elaborar un estudio estructural y geomorfológico detallado, en el cual se encuentren relaciones entre la dirección de los drenajes con patrones estructurales de fallas regionales.

Desarrollar perforaciones en las capas de la Formación Paja donde se evidenció la mineralización de Yeso, con el fin de conocer con mayor exactitud la calidad de SO_3 y reconocer futuras reservas para explotaciones.

Referencias Bibliográficas

- Blandón Montes, A. (2002). Principios de estratigrafía. (Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas). Pág. 12-17.
- Caballero, V., Parra, M., & Mora Bohórquez, A. R. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno Tardío-Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de nuevo mundo, cuenca valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, 32(1), 45-77.
- Cabrales García, J. A. (2002). Análisis químico de materiales silicoaluminosos por fluorescencia de rayos X (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Pág. 14 -15.
- Cañón, A. L. (2008). La industria del cemento en Colombia. Determinantes y comportamiento de la demanda (1996-2005). 2008. 53f. Monografía de Ciencias Económicas) Facultad de Ciencias Económicas, Pontificia Universidad Javeriana. Pág. 6-8.
- Cediél, F., 1968, El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental: *Boletín Servicio Geológico Nacional*, v. 16. Pág. 5-96.
- Cemex México (2017). Prontuario para Diagnóstico del Proceso Capítulo IV: Cemento. Pág. 3.
- Cemex México (2017). Prontuario para Diagnóstico del Proceso Capítulo Canteras. Pág. 15-16-21.
- Cerulla, J. P. (1997). Extracción, explotación, minería y proceso de tratamiento del yeso. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Pág. 572.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A. B., & Pulham, A. J. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG bulletin*, 79(10), 1421-1442.
- Cruz, B., J. & Vargas, H., R. (1968). Informe sobre los yesos de la Formación Rosablanca en La Mesa de Los Santos. *Inventario Minero Nacional Zona III – Bucaramanga*,5-7.
- Cruz, J. A., & Vargas, R. (1972). Informe sobre los yesos en la Formación Rosa Blanca en la Mesa de Los Santos. *Ingeominas, Colombia, Boletín Geológico*, 20, 105-129.

- Cuello, E. M., & Pineda J. G. (2010). Estudio Reológico de Pulpas Minerales de Yeso Mina “La Nacuma” Santander. Universidad Industrial de Santander, Facultad Fisicoquímica, Escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Pág. 23.
- De Julivert, Z. (1963). Estudio Petrográfico de las Calizas de la Formación Rosablanca de la Región de la Mesa de los Santos. (Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología, (15).
- Escobar, M. (2010), Elementos de Cartografía geológica, (Postgrado en Geología Petrolera). Pág. 2 – 5.
- Gómez, A. C., Consuegra, N. P., & Ochoa, F. L. Levantamiento de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos.
- Gómez, J. D., & Cuervo, R. G. (2012). Estudio geológico enfocado a la caracterización paisajística de la Mesa de los Santos, Santander, Colombia. Proyecto de Grado. Trabajo de Investigación. Escuela de Geología. UIS. Bucaramanga. p, 164.
- Gómez, J., Nivia, Á., Montes, N., Almanza, M., Alcárcel, F., & Madrid, C. (2015). Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. Compilando la geología de Colombia: Una visión A. Pág.10 – 11.
- Guillén, V., & Luis, J. (2005). Nuevas aplicaciones de recursos yesíferos: desarrollo, caracterización y reciclado (Doctoral dissertation, Minas). Pág. 28.
- Gutierrez, O. (2014). Caracterización química y mineralógica de dos cementos comerciales y su evolución en función del tiempo. (Instituto tecnológico de Toluca). Pág. 40 – 48.
- IGAC, CIAT, (2007), Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano, (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). Pág. 5 -6, 8- 13.
- Julivert, M., Barrero, D., & Navas, J. (1964). Geología de la mesa de Los Santos. BOLETÍN DE GEOLOGÍA N. 18. Pág. 9.
- Julivert, M., y Téllez, N. (1961). Sobre la presencia de Fallas de edad precretácica y post-Girón (Jura-Triásico) en el flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología, UIS. Pág 9.
- Labahn, O., & Kohlhaas, B. (1985). Prontuario del cemento. Reverte. Pag. 3-5-10-30-31.
- Livia, W. P., Quintero, C. V., & Parra, O. A. O. (2007). Beneficio de minerales de yeso provenientes de la mina la nacuma “municipio de los santos”. Scientia Et Technica, 1(36).

Manual de Canteras, Cemex Colombia, 2016. Pág 16.

PIZARRO, C. O. M., & DÁVILA, A. A. C. (2009). ESPECTROMETRÍA DE FLOURESCENCIA DE RAYOS X. Aventuras del Pensam., Pag (1-3)

Pulido, O. (1985). Plancha 135–San Gil, Escala 1: 100.000. INGEOMINAS, Bogotá. Pág 15.

Sanz Arauz, D. (2009). Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas (Doctoral dissertation, Arquitectura). Pág. 44-46-52.

Schlumberger. (2017). Análisis Estratigráfico. (Oilfield Glossary).
http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/stratigraphic_analysis.aspx

Selles, J. (2014). Cartografía Geológica. Levantamiento Geológico 2014. Pág. 19 -20

SGC, (2013), Plan estratégico del conocimiento geológico del territorio colombiano 2013 -2023. (Ministerio de minas). Pág. 7 – 15.

Singewald, Q. D. (1950). Mineral resources of Colombia. US Geol. Survey Bull, pgs 140-142.

Tobón, J. I., & Montoya, L. M. (2006). Análisis comparativo entre algunas materias primas minerales nacionales e importadas utilizadas en la industria del cemento. Boletín de Ciencias de la Tierra, (19), 58.

Torres, V., & Estratigrafía, J. A. (1994). Principios y métodos. Madrid. Rueda. Pág. 1- 15, 135-136.

Valencia, J. (2013), Sistema de proyecciones cartográficas usadas, (Clases teóricas Cartografía) (Universidad Industrial de Santander). Pág. 2 – 7.

Vargas, C, (2008). Cartografía Geológica a Escala 1:25000 de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. Escuela de Geología. UIS. Bucaramanga.

Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, B. B., Restrepo, J., & Hernan, A. (1970). Mineral resources of the southern half of Zone III Santander, Norte de Santander and Boyaca, Colombia (No. 70-359). US Geological Survey. Pág. 65.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. US Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, Pág, 118.