

**INFORME DE PRÁCTICA ACADÉMICA REALIZADA EN LA COMPAÑÍA
ESMERALDAS MINING SERVICES: VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DE DATOS
GEOLÓGICOS DE LOS AÑOS 2012 A 2015 DE LOS NIVELES 89 Y 99 DE LAS MINAS
CATEDRAL Y PUERTO ARTURO EN EL MUNICIPIO DE MUZO-BOYACÁ**

Maria Fernanda Cardona Yepez



Universidad de Caldas

Facultad de Ciencia Exactas y Naturales

Programa de Geología

Manizales, Colombia

2022

**INFORME DE PRÁCTICA ACADÉMICA REALIZADA EN LA COMPAÑÍA
ESMERALDAS MINING SERVICES: VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DE DATOS
GEOLÓGICOS DE LOS AÑOS 2012 A 2015 DE LOS NIVELES 89 Y 99 DE LAS MINAS
CATEDRAL Y PUERTO ARTURO EN EL MUNICIPIO DE MUZO-BOYACÁ**

Maria Fernanda Cardona Yepez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de: Geóloga

Director académico:

Geólogo Diego German Loaiza García

Director empresarial:

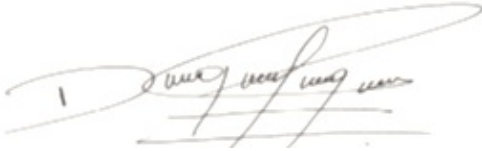
Geólogo Luis Fernando Giraldo Giraldo

Manizales, Colombia

2022

NOTA DE APROBACIÓN

APROBADA

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, sweeping initial 'I' followed by several cursive letters. The signature is written over two horizontal lines.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme en cada momento de mi vida y permitirme iniciar una nueva etapa personal y laboral. A mis padres y hermano por apoyarme, aconsejarme y motivarme durante mi carrera.

Agradezco a mis docentes de la Universidad de Caldas porque con su entrega, paciencia y conocimiento ayudaron a culminar mi carrera profesional.

A mis compañeros y amigos que hicieron de mi paso por la universidad una experiencia llena de aprendizaje y buenos momentos.

Agradezco a mi director empresarial y compañeros del área de geología de la Compañía Esmeraldas Mining Services S.A.S. por su compromiso, acompañamiento y enseñanzas durante el desarrollo de mi practica académica.

RESUMEN

En el presente informe se explica de manera detallada las actividades realizadas durante la práctica académica en un periodo de seis meses, comprendidos entre el 01 de octubre del 2021 al 31 de marzo de 2022, la cual se llevó a cabo en la mina Puerto Arturo ubicada en el municipio de Muzo, Departamento de Boyacá. El proyecto fue enfocado en la verificación, validación y depuración de los datos geológicos de los años 2012 a 2015, de los niveles 89 y 99 de las minas Catedral y Puerto Arturo, con el objetivo de realizar un control y aseguramiento de la calidad de la información geológica almacenada, obteniéndose como resultado una base de datos confiable, que permitió una correcta interpretación geológica del yacimiento, al igual que la actualización de los mapas geológicos y finalmente un modelo geológico general de la zona de interés productivo.

Las actividades realizadas en la práctica académica consistieron en varias etapas: revisión de la información geológica almacenada, trabajo de campo para hacer los respectivos levantamientos geológicos a interior mina de los frentes, verificación, análisis e interpretación de los datos geológicos y realización del informe donde se reúne toda la información obtenida, al igual que los resultados y las recomendaciones para generar una base de datos organizada y de calidad, no solo para tener facilidad al momento de acceder a la información si no para dar un buen uso a los datos almacenados de años anteriores que pueden ser de gran utilidad al momento de definir zonas de interés productivo.

Palabras clave: Validación, verificación, datos, interpretación, modelo geológico.

ABSTRACT

This report explains in detail the activities carried out during the academic practice in a period of six months, between October 1, 2021 and March 31, 2022, which was carried out in the Puerto Arturo mine located in the municipality of Muzo, Department of Boyacá. The project was focused on the verification, validation and purification of the geological data from the years 2012 to 2015, from levels 89 and 99 of the Catedral and Puerto Arturo mines, with the objective of carrying out a control and quality assurance of the stored geological information, obtaining as a result a reliable database, which allowed a correct geological interpretation of the deposit, as well as the updating of geological maps and finally a general geological model of the area of productive interest.

The activities carried out in the academic practice consisted of several stages: review of the stored geological information, field work to carry out the respective geological surveys inside the mine of the fronts, verification, analysis and interpretation of the geological data and preparation of the report where brings together all the information obtained, as well as the results and recommendations to generate an organized and quality database, not only to have ease when accessing the information, but also to make good use of the data stored for years. above that can be very useful when defining areas of productive interest.

Keywords: Validation, verification, data, interpretation, geological model.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
3.1 Objetivo general.....	3
3.2 Objetivos específicos.....	3
4. LOCALIZACIÓN.....	4
5. ANTECEDENTES.....	5
6. MARCO TEORICO.....	9
6.1 Conceptos base.....	9
6.2 Softwares utilizados.....	13
7. MARCO GEOLÓGICO.....	14
7.1 Geología Regional.....	14
7.2 Estratigrafía.....	16
7.2.1 Estratigrafía regional.....	16
7.2.1.1 Formación Rosablanca (Kir).....	16
7.2.1.2 Formación Paja (Kip).....	18
7.2.1.3 Formación Tablazo (Kit).....	19
7.2.2 Estratigrafía Local.....	20

7.2.2.1 Formación Muzo (Hauteriviano – Barremiano)	20
7.2.2.2 Formación Capotes (Aptiano tardío – Albiano temprano)	21
7.2.2.3 Formación Pacho (Albiano medio alto – Albiano tardío alto).....	23
7.3 Geología local	24
7.3.1 Lutitas calcáreas	24
7.3.2 Lutitas silíceas gris oscuro a negro.....	25
7.3.3 Lutitas silíceas gris claro	26
7.3.4 Brechas tectónicas	27
7.3.5 Brechas hidrotermales	27
7.3.6 Vetas y vetillas.....	28
7.4 Geología estructural	28
7.4.1 Anticlinal La Chapa- Borbúr	30
7.4.2 Sinclinal y Anticlinal de Muzo.....	31
7.4.3 Sinclinal de Coscuez.....	31
7.4.4 Falla del Río Minero.....	32
7.4.5 Falla de Peñas Blancas	32
7.4.6 Falla de Itoco	32
7.5 Características generales de la esmeralda	33
7.6 Tipo de depósito	35
7.6.1 Origen ígneo	35

7.6.2 Origen sedimentario: interacción roca caja (carbonosa – calcárea) con fluidos hipersalinos de procedencia evaporítica	35
7.7 Mineralización.....	37
8. ACTIVIDADES DESARROLLADAS.....	38
8.1 Verificación, validación y transcripción de los datos geológicos de los niveles 89 y 99 ...	39
8.1.1 Metodología.....	39
8.1.1.1 Etapa de reconocimiento de la información.....	40
8.1.1.2 Etapa de trabajo de campo	40
8.1.1.3 Etapa de revisión, análisis e interpretación de la información.....	42
8.1.1.4 Etapa de transcripción de los datos geológicos del nivel 89 y nivel 99.....	47
8.1.1.5 Etapa de actualización mapa geológico en el programa AutoCAD y modelo geológico general en el programa Micromine	52
8.1.2 Resultados.....	52
8.1.2.1 Nivel 99.....	52
8.1.2.2 Nivel 89.....	62
9. CONCLUSIONES.....	73
10. RECOMENDACIONES.....	74
11. BIBLIOGRAFÍA	75
12. ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del Cinturón Esmeraldífero Occidental	4
Figura 2. Muestra de lutitas negras calcáreas	25
Figura 3. Muestra de brecha hidráulica silícea y veta de dolomita.....	26
Figura 4. Mapa geológico generalizado de los distritos mineros de Muzo-Quipama y Maripí ..	30
Figura 5. Principales variedades del Berilo	33
Figura 6. Diagrama flujo metodología aplicada para el trabajo de grado.....	39
Figura 7. Formato Excel para la descripción geológica de los frentes	43
Figura 8. Ejemplo de desface de coordenadas del nivel 99	44
Figura 9 Ejemplo de desface de coordenadas del nivel 89	45
Figura 10. Ejemplo de código de ficha	48
Figura 11. Formato Access para las descripciones geológicas de los frentes	50
Figura 12. Diagrama circular de los datos totales del nivel 99.....	53
Figura 13. Diagrama flujo análisis para eliminar datos	54
Figura 14. Diagrama circular de los datos eliminados del nivel 99.....	56
Figura 15. Diagrama circular de los datos por año del nivel 99	58
Figura 16. Diagrama de barras de los datos totales, migrados y eliminados del nivel 99	59
Figura 17. Actualización modelo geológico de la zona de interés productivo del nivel 99	62
Figura 18. Diagrama circular de los datos totales del nivel 89.....	63
Figura 19. Diagrama circular de los datos eliminados del nivel 89.....	64
Figura 20. Diagrama circular de los datos por año del nivel 89	68
Figura 21 Diagrama de barras de los datos totales, migrados y eliminados del nivel 89	69

Figura 22. Actualización modelo geológico de la zona de interes productivo del nivel 89 72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales propiedades físicas de la esmeralda	34
Tabla 2. Principales propiedades ópticas de la esmeralda	34
Tabla 3. Cronograma de actividades práctica académica	38
Tabla 4. Datos totales verificados y validados del nivel 99.....	53
Tabla 5. Datos eliminados del nivel 99.....	56
Tabla 6. Verificación de coordenadas nivel 99.....	57
Tabla 7. Datos verificados y validados por año del nivel 99	57
Tabla 8. Datos totales, migrados y eliminados del nivel 99	58
Tabla 9. Datos del registro fotográfico del nivel 99	60
Tabla 10. Datos con modificaciones en el mapa geológico del nivel 99	60
Tabla 11. Datos verificados y validados del nivel 89	63
Tabla 12. Datos eliminados del nivel 89.....	64
Tabla 13. Verificación de coordenadas nivel 89.....	66
Tabla 14. Datos verificados y validados por año del nivel 89	67
Tabla 15. Datos totales, migrados y eliminados del nivel 89	68
Tabla 16. Datos del registro fotográfico del nivel 89	71
Tabla 17. Datos con modificaciones en el mapa geológico del nivel 89	71

ANEXOS

Anexo 1. Columna estratigráfica generalizada del Cinturón Esmeraldífero Occidental.	79
Anexo 2. Columna estratigráfica Formación Muzo vía San Pablo de Borbur-Pauna..	80
Anexo 3. Columna estratigráfica Formación Capotes vía Muzo-Chiquinquirá..	81

1. INTRODUCCIÓN

La validación y verificación de los datos es un procedimiento fundamental al momento de determinar su calidad, para así generar información geológica confiable. Realizar de manera correcta y detallada cada etapa de un proceso geológico es de gran importancia, ya que permite obtener resultados más exactos y precisos.

Este procedimiento va desde la recolección de datos en campo hasta el procesamiento y almacenamiento de la información en una base de datos. El tipo de información recopilada comprende descripción litológica, composición de la roca, color, contactos litológicos, mineralogía, presencia de flujo de agua, espesor de las unidades, toma de datos estructurales, identificación de estructuras, registro fotográfico, toma de distancias, coordenadas y producción. Posteriormente se realiza el mapeo geológico y modelamiento que permite definir el tamaño del yacimiento. Los errores que se pueden llegar a presentar en la toma de datos, al momento de su procesamiento o al llevar la información a la base de datos, generaría una disminución en la confiabilidad de las interpretaciones que se realizan.

El presente trabajo tuvo como objetivo generar un control de la calidad de la información geológica de los años 2012 a 2015 almacenada en formato Excel y en base de datos Access para los niveles 99 y 89 de las minas Puerto Arturo y Catedral respectivamente. Los criterios que se tuvieron en cuenta para la depuración de los datos fueron coordenadas, registro fotográfico y descripción geológica.

2. JUSTIFICACIÓN

En el presente trabajo de investigación se pretende llegar a una base de datos geológica organizada y validada para asegurar la calidad y confiabilidad de los mapas geológicos y modelo geológico en los niveles 99 y 89 de las minas Puerto Arturo y Catedral. Sin embargo, las descripciones geológicas y los mapas geológicos que se generaron para los niveles 99 y 89 presentan algunas dificultades ya que algunos carecen de información geológica como mineralogía, estructuras, producción o registro fotográfico.

Por otro lado, los datos de coordenadas y elevaciones que se tienen en las descripciones en formato Excel no son correctos y deben ser ajustadas al plano. Algunas descripciones geológicas no presentan correlación con lo que se observa mediante las fotografías, o con lo digitalizado en los planos.

Por lo anterior es fundamental realizar la verificación, validación y depuración de la información geológica y generar una base de datos en formato Access, para no solo dar mayor facilidad al momento de acceder a la información, si no dar una garantía de confiabilidad. Al igual que hacer la actualización de los mapas y el modelamiento geológico respectivo para tener una idea más clara del yacimiento y finalmente delimitar las zonas de interés productivo.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Revisar la información geológica de los años 2012 a 2015 de los niveles 89 y 99 desde la zona Norte hasta la zona Sur de las minas Catedral y Puerto Arturo; realizar una actualización de los mapas geológicos y generar un modelo geológico general.

3.2 Objetivos específicos

- Verificar, validar y depurar los datos geológicos de los niveles 89 y 99 almacenada en formato Excel y migrada a formato Access, para determinar qué datos pueden llegar a tener una importancia para las actuales producciones de la mina.
- Actualizar las descripciones geológicas almacenadas de acuerdo con la calidad de la información y migrarla a un formato Access.
- Actualizar los mapas geológicos de acuerdo a la información de la base de datos previamente actualizada.
- Delimitar zonas de potencial productivo acorde con las características identificadas en sectores actuales de explotación de las minas Catedral y Puerto Arturo.

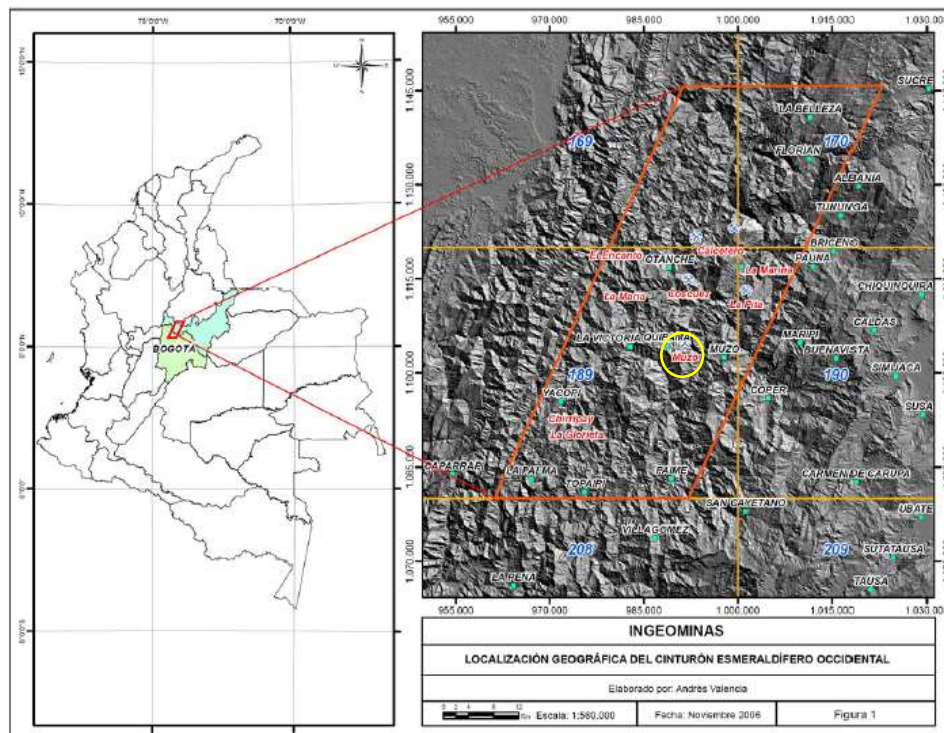
4. LOCALIZACIÓN

La mina Puerto Arturo (título minero 121_95M) de la cual es propietaria la compañía Puerto Arturo S.A.S. se encuentra ubicada al Occidente del departamento de Boyacá en el municipio de Muzo, en el Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEO) el cual se encuentra sobre el flanco Occidental de la Cordillera Oriental. (Figura 1).

Está limitada al Norte por los municipios de Otanche y San Pablo, al Oriente con los municipios de Maripi y Coper, al Occidente con el municipio de Quipama y al Sur con el departamento de Cundinamarca.

Figura 1.

Localización geográfica del Cinturón Esmeraldífero Occidental



Tomado de Instituto colombiano de geología y minería INGEOMINAS. (2006)

5. ANTECEDENTES

Para el área de estudio existen numerosas publicaciones geológicas de carácter local y regional, enfocados en litología, génesis, estratigrafía, mineralogía, geoquímica, paleontología, análisis estructural y prospección geoquímica de las áreas esmeraldíferas en Muzo-Boyacá. Sin embargo, aún no se tienen estudios sobre las aplicaciones de QA/QC (Quality Assurance/Quality Control) que permitan tener un control y aseguramiento de la calidad de los datos obtenidos en los diferentes procesos geológicos realizados en la mina Puerto Arturo, para los años 2012 a 2015.

En la compañía Esmeraldas Mining Services S.A.S. desde el área de geología a partir del año 2016 y hasta la actualidad se cuentan con protocolos de control de calidad de la información obtenida al momento de realizar los levantamientos geológicos. Este procedimiento consiste en hacer una revisión, verificación y validación de: datos recolectados en campo, actualización de los mapas geológicos, registro de la información en la base de datos y modelamiento del yacimiento.

Dentro de los estudios realizados en la región de Muzo y en la mina Puerto Arturo se encuentran:

Scheibe (1916) a partir de estudios realizados al Sur del río Itoco, describe una sucesión estratigráfica que de base a techo llamó: El cambiado, La cama, El cenicero gris, El cenicero rojo y Capas buenas o esmeraldíferas (capas productoras de esmeralda.) Presenta ideas sobre el origen magmático de la mineralización de esmeraldas por diques pegmatíticos, aunque admite la inexistencia en afloramiento.

Oppenheim (1948) realiza una descripción general de la litología regional y local de Muzo, donde hace referencia a las zonas de El cambiado, La cama, El cenicero, la asociación mineralógica que acompaña las esmeraldas (calcita, dolomita, parisita, pirita y cuarzo, muy raramente barita, fluorita y apatito) y presenta una localización de las principales minas de la zona y sus métodos de explotación.

Bürgl (1955, 1959) mediante su trabajo estableció bases paleontológicas, estratigráficas y tectónicas del yacimiento de Muzo para definir la distribución de las vetas y la extensión de la exploración. Determina una sucesión litológica para la zona mineralizada: esquistos arcillosos negros ricos en vetas de calcita, pirita y albita, ubicado en el núcleo del anticlinal de Itoco, de edad Albiano medio bajo, sedimentos compuestos por esquistos claros y arenosos, intercalados con pizarras arcillosas de color negro a gris claro, aflorando en el sitio de las Martínez, de edad Albiano medio alto, pizarras silíceas y micáceas de color gris claro a negro, de edad Albiano superior y esquistos arcillosos, aflorando desde el alto El Perú, hasta el alto Itoco y entre la región el Sorque y el río Minero.

Describe de manera general las principales estructuras geológicas como el sinclinal y anticlinal de Itoco y las fallas del río Minero y río Itoco. Presenta argumentos donde se podría establecer un origen magmático de la mineralización de esmeraldas debido a las intrusiones básicas de la región.

Restrepo (1961) realiza un estudio estructural, determina los Horts de Muzo y Coscuez, los anticlinales de Itoco y de Pazurcha, el sinclinal de Terry y la falla del río Itoco o Minero la cual considera una fosa tectónica de 5.000 metros de desplazamiento vertical. Litológicamente considera las minas de Muzo compuestas por arcillolitas negras con alta cantidad de pirita y con numerosas fisuras donde se emplazan las vetas esmeraldíferas.

Medina (1970) mediante su estudio de la génesis de los depósitos esmeraldíferos de Muzo, propone un origen autóctono para explicar el origen de las esmeraldas. Concluye que todos los elementos necesarios para su formación están originalmente en las lutitas negras y que mediante soluciones descendentes (hidrotermales de origen no magmático), generan lixiviación de los elementos de las lutitas carbonosas que finalmente formaron las esmeraldas.

McLaughlin & Arce (1971) Realizan un resumen de las observaciones geológicas de la época con respecto a las esmeraldas y apoyan la idea de un origen epigenético para la mineralización por una relación directa con las capas salinas del Cretáceo temprano. Determinan que los estratos que contienen esmeraldas de Chivor y Gachalá son aproximadamente correlacionables con la secuencia Berrasiano - Valanginiano.

Beus & Mineev (1972) analizan la distribución química de los elementos en la zona tectónica y argumentan una fuerte lixiviación de elementos como K, V, Th, U, Y, Mo, Sn, Pb, Zn, Cs, Cr, REE y concentración por alteración metasomática de Na, Mn, Mg, CO₂ y S en lutitas negras y venas y presencia de Be proveniente de las soluciones profundas.

Naciones Unidas e INGEOMINAS realizan un estudio geológico, estructural y geoquímico en Muzo, Coscuez, Gachalá y alrededores de Pacho y determinan fallas con dirección principal N10°E, N30°W y N20°-30°E, pliegues en dirección E-W, N40°E Y N60°W y estructuras mayores en dirección N-S. Determinan vetas de calcita + esmeralda de 30cm de espesor con orientación N30°W, en sectores tectonizados. Al igual determinan una secuencia estratigráfica compuesta por lutitas negras y calizas correlacionables con la Formación Villeta.

Hall (1976) realiza un estudio geoquímico y mineralógico, determinando 6 etapas de formación de minerales de las vetas de Muzo e identificando el estadio G-III-A como portador

de las soluciones generadoras de esmeraldas. Concluye que las vetas esmeraldíferas tienen más afinidad con procesos postmagmáticos neumatolíticos e hidrotermales.

Schwarz (1987) relaciona las esmeraldas como producto de soluciones hidrotermales producidas en temperaturas bajas y ricas en CO₂, S, Na, Ca y Mg, además establece una alteración metasomática con temperaturas de hasta 400°C con albitización durante la carbonatación en un proceso de metamorfismo regional.

Pupo & Rodríguez (1989) realizan un estudio geológico en el sector Coscuez describiendo una secuencia de 258 metros de espesor conformada por lutitas negras y asocian la mineralización de las esmeraldas con calcita, cuarzo, fluorita, caolinita, pirita, albita, parisita y codazzita.

Giuliani & Cheilletz *et al.* (1991) realizan geoquímica de isótopos de Azufre, Oxígeno y Carbono de las esmeraldas colombianas y concluyen que los depósitos esmeraldíferos corresponden a eventos mesotermales 300°C desarrolladas por reducción termoquímica de salmueras ricas en sulfatos a sulfohidrogenadas, por la interacción de los estratos ricos en materia orgánica. Cheilletz & Giuliani (1996) y Ottaway (1991), Ottaway *et al.* (1994) plantean un modelo hidrotermal – sedimentario para la formación de las esmeraldas de Colombia.

INGEOMINAS (2006) realizan un modelo geológico integral y potencial de los recursos de los cinturones esmeraldíferos en Colombia, a partir de levantamientos estratigráficos y estructurales.

6. MARCO TEORICO

El control y aseguramiento de la calidad de la información que se obtiene en las practicas geológicas, implica un proceso de verificación, validación y depuración de datos geológicos que permita obtener un mejor conocimiento de las zonas de interés productivo y su posterior explotación.

6.1 Conceptos base

- QA/QC (Quality Assurance/Quality Control) la implementación del aseguramiento y control de calidad en cualquier proceso geológico permite garantizar la confiabilidad de los datos producidos y permite generar información de alta calidad. Al elaborar e implementar protocolos de trabajo para evitar o minimizar errores en algún procedimiento es cuando se materializa el aseguramiento, y por medio del control de calidad se realizan procedimientos continuos para monitorear la calidad y detectar errores.
- QA (Quality Assurance) “conjunto de acciones planificadas y sistemáticas necesarias para proporcionar la confianza adecuada de que un producto o servicio satisfaga los requerimientos dados sobre calidad” (International Organization for Standardization, 1995).
- QC (Quality Control) “conjunto de técnicas y actividades de carácter operativo, utilizadas para verificar los requerimientos relativos a la calidad del producto o servicio.” (International Organization for Standardization, 1995).

“Practicar el control de calidad es desarrollar, diseñar manufacturar y mantener un producto de calidad que sea el más económico, el más útil y siempre satisfactorio para el consumidor” (Ishikawa,1988).

- Calidad de datos: “El término calidad, en relación con los datos, toma sentido por el hecho de que los datos al igual que los productos y servicios, deben adecuarse al uso que se les pretende dar. El término preciso para el uso en este caso implica que, dentro de cualquier contexto operacional, el dato que va a ser utilizado satisfaga las expectativas de los usuarios de los datos. Dichas expectativas se satisfacen en gran medida si los datos son útiles para lo que estos los necesitan, son fáciles de entender e interpretar, y además son correctos” (Loshin, 2001; Redman 2001).

“Para garantizar estos aspectos se debe hacer, en principio, un diseño apropiado de la base, tabla o lista de datos, con el fin de definir correctamente los atributos o tipos de datos en la misma; y posteriormente realizar un adecuado diseño de los procesos de producción de datos, garantizando que los datos lleguen a la base o tabla de datos, libres de defecto y con las demás características deseadas” (Lee & Strong, 2003; Redman, 2001).

- Verificación de datos es el proceso de comprobación que asegura la entrega de información confiable a los programas o aplicaciones que lo utilizan y garantiza que los datos cumplan con los requisitos y parámetros de calidad.

“La última etapa de la gestión de los datos debe ser siempre una evaluación de la calidad de la misma mediante su verificación.” (Connet y Lee,1990).

- Validación de datos es “el proceso por el cual los datos son filtrados y aceptados o rechazados en base a procedimientos definidos” (Pla, 2005).

Según Pla (2005) en la validación de datos hay puntos a considerar como:

- Verificar la exactitud de los datos críticos, independiente si fueron ingresados a mano o de manera digital.
- Las revisiones deben ser parte de procedimientos rutinarios para identificar errores.
- Deben existir procedimientos estándares para definir datos sin procesar, seguridad para la entrada de datos y revisión.
- Cualquier error que ocurra con el instrumento de medición debe registrarse junto con los datos sin procesar. Debe evaluarse el impacto del error sobre los datos y tomar acciones necesarias.

Al validar los datos se puede detectar (Pla, 2005):

- Potenciales problemas en el análisis.
 - Eventos inusuales durante el muestreo.
 - Errores en la transcripción de los datos.
 - Errores en la presentación de los datos.
- La validación de una base de datos geológica es la revisión, análisis y corrección de los datos recolectados durante un proceso geológico, posibilitando eliminar información errónea.
 - Depuración de datos consiste en identificar datos incorrectos, incompletos, inexactos o irrelevantes para ser modificados, sustituidos o eliminados.
 - “Los datos están definidos como los antecedentes necesarios para llegar al conocimiento exacto de algo o para deducir las consecuencias legítimas de un hecho, así como la información dispuesta de manera adecuada para su tratamiento por un ordenador.” (Real Academia Española).

- “Una base de datos es un conjunto de datos almacenados entre los que existen relaciones lógicas y que ha sido diseñada para satisfacer los requerimientos de información de una empresa u organización.” (Juárez, 2006).

Dentro de las ventajas de contar con una base de datos esta: facilidad al momento de acceder a la información, coherencia de resultados, eliminación de información inconsistente e integridad de la información.

- Datos geológicos: conjunto de elementos, procesos y eventos ocurridos en la naturaleza, que pueden ser observables o medibles. Según Alperin, M. (2013) los datos geológicos se clasifican de acuerdo a la forma de obtención por lo que se pueden identificar seis grupos:

Los datos observacionales que incluyen observaciones y mediciones de elementos y eventos naturales en campo o laboratorio; los datos experimentales que son medidas obtenidas a partir de laboratorio; los datos métricos como el método de muestreo donde se distinguen las mediciones (espesor de una capa, rumbo, buzamiento, distancias, medidas microscópicas como ángulos ópticos, de clivaje o índices de refracción); los recuentos (como cantidad de un mineral reconocido en un campo del microscopio, numero de pozos de petróleo en un área, numero de frentes de explotación en una mina, etc.); los datos cualitativos que incluyen características o propiedades que identifican el estudio en cuestión, por ejemplo la descripción de un fósil, un mineral o estructura y los datos de ordenamiento, donde no se puede asignar una escalad de medida por ejemplo para describir el color o contenido de materia orgánica en una roca.

- El levantamiento geológico a interior mina es un procedimiento que proporciona información geológica como coordenadas, litología, minerales, estructuras (fallas, pliegues o diaclasas), identificación de vetas, vetillas o patinas, tipo de filtración de agua, espesor de las capas y datos estructurales.

- “El modelado geológico es una representación de la realidad, permitiendo realizar un análisis más detallado sobre un yacimiento en cuestión. Los modelos de yacimientos minerales, constituyen sistematizaciones de información geológica de gran valor para la exploración y la evaluación de territorios que presenten atributos definidos en el modelo, y que los hagan perspectivas para el descubrimiento de nuevos recursos minerales” (Ariosa, 2003).

6.2 Softwares utilizados

- Access: es un programa que forma parte de Microsoft Office y es utilizado para la gestión de datos a través de informes y consultas, permite gestionar una base de datos de forma sencilla e intuitiva, importar datos de otros softwares, entre otras características.

- Excel: es un programa que permite realizar hojas de cálculo, con listas números y clasificaciones.

- AutoCAD: es un programa de diseño asistido por computador creado en 1982 por la compañía Autodesk que permite la creación, edición y visualización de diseños 2D y modelos 3D con sólidos, superficies y objetos.

- Micromine: es un proveedor de soluciones de software innovadora enfocado en modelamiento y muy utilizado en la industria minera durante las distintas fases de la misma, desde la exploración geológica y la gestión de datos, hasta la estimación de recursos, diseño de minas en 3D, la planificación y control de producción.

7. MARCO GEOLÓGICO

7.1 Geología Regional

El área de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Oriental de Colombia. La cual se caracteriza por un basamento constituido por rocas metamórficas del Paleozoico y por rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Jurásico, el cual ha sido controlado por eventos tectónicos, transversales y longitudinales que ha permitido la exhumación de una secuencia sedimentaria del Mesozoico y Cenozoico de gran espesor deformadas por fallamientos y plegamientos del Neógeno.

Las rocas del Cenozoico y depósitos inconsolidados del cuaternario se encuentra cubriendo parcialmente la región, lo que dificulta reconocer algunas estructuras presentes; sin embargo, algunos autores han reconocido estructuras de fallamiento transcurrente en la zona axial de la Cordillera Oriental, asociadas regionalmente a fallas subverticales (Acosta et al., 2007).

La Cordillera Oriental se considera como un cinturón plegado y fallado de antepaís adyacente al dominio cratónico de América del sur, el cual resulta de la inversión Neógena de una cuenca retroarco (back-arc) Mesozoica y Cenozoica al Este de la subducción andina con un predominio de sedimentación marina. (Branquet et al., 1999a).

A principios del Cretácico la invasión marina tuvo lugar en lo que hoy es la parte central de la Cordillera Oriental y el Valle del Magdalena por lo que esta zona constituyó un gran depocentro, que según las reconstrucciones paleogeográficas realizadas por (Etayo et al., 1997) fue una condición que perduro la mayor parte del Cretácico Inferior y que durante esta época tuvo lugar la depositación de las unidades sedimentarias como la Formaciones Rosablanca, Furatena, Muzo y Capotes que afloran en la zona de estudio.

Los depósitos colombianos de esmeraldas se encuentran ubicados en los cinturones esmeraldíferos Oriental y Occidental (CEOC y CEOR) de la cordillera oriental donde se preservó uno de los registros sedimentarios más completos del cretácico inferior del país. La sedimentación se dio sobre una cuenca extensional tectónicamente activa, donde se acumuló una secuencia sedimentaria de gran espesor compuesta por lutitas negras calcáreas y silíceas con alto contenido de materia orgánica, y la mineralización de esmeraldas se generó a lo largo de fallas en zonas brechadas y grietas de tensión afectadas por fracturamiento hidráulico. (Giuliani et al., 1990).

Los depósitos de esmeralda del cinturón Oriental corresponden a los Distritos mineros Gachalá (minas de la Vega de San Juan, Las Cruces, El Diamante y El Toro), Chivor (minas de Gualí, Chivor, Buenavista y Mundo Nuevo) y Macanal. Los cuales hacen parte del grupo Cáqueza constituido por tres formaciones, que en orden ascendente corresponden a: Calizas del Guavio (Berriasiano), Lutitas de Macanal (valanginiano) y Areniscas de Las Juntas (Ulloa & Rodríguez, 1979). Para el caso de los depósitos del cinturón Occidental las mineralizaciones de esmeraldas se hospedan en la formación Muzo (Hauteriviano-Barremiano) y formación Rosablanca (Valanginiano inferior). (Reyes et al., 2006) que corresponden a los distritos mineros de Muzo, Coscuez, Peñas Blancas, La Palma – Yacopí y La Pita.

Los cinturones esmeraldíferos se encuentran fuertemente plegados y afectados por tectónica transpresiva debido a la presencia de fallas inversas con salto transcurrente, como las fallas Santa María y Lengupá en el CEOR, aunque también se encuentran cabalgamientos importantes como el sistema de fallas de La Salina en el CEOC; la mayoría de las estructuras se orientan en sentido SW-NE, con excepción de algunas fallas, como la del Itoco e Ibacapí en el CEOC o la falla El Frijol en el CEOR, que se disponen transversalmente (Reyes et al., 2006; Terraza et al., 2008; Montoya et al., 2008).

7.2 Estratigrafía

7.2.1 Estratigrafía regional

La mina Puerto Arturo ubicada en el municipio de Muzo-Boyacá hace parte de la plancha 189 La Palma, donde afloran unidades sedimentarias que de manera regional se describirán desde la más antigua a la más reciente. En el Anexo 1 se encuentra la columna generalizada del cinturón esmeraldífero Occidental.

7.2.1.1 Formación Rosablanca (Kir)

Esta unidad fue definida por Morales et al. (1958) para referirse a calizas masivas fosilíferas con capas de margas con gradación a shales negros. El nombre se deriva del Cerro Rosa Blanca localizado al noreste de la Concesión De Mares; el cual se atribuye a Wheeler (1929) en un informe inédito.

En esta formación se reconocen 3 segmentos litológicos: el segmento inferior se compone de capas delgadas a gruesas de micrita y micrita arcillosa color negro tabulares, intercaladas con estratos de lodolitas calcáreas carbonosas y arcillolitas negras, con algunos nódulos de pirita. El segmento medio está compuesto por lodolita negra calcárea a ligeramente calcárea dispuestas en capas delgadas con estratificación y laminación plana paralela, estas se intercalan con capas delgadas de micrita arcillosa negra, al igual se presentan capas gruesas de micrita negra con cavernas de disolución. El segmento superior está constituido por micrita color gris oscuro a negro dispuesta en capas gruesas, intercaladas con arcillolitas negras carbonosas, calcáreas y silíceas, con fósiles de bivalvos y amonitas. (Reyes et al., 2006).

En el Distrito minero de Peñas Blancas hacia la parte superior de la unidad afloran capas de micritas intercaladas con lodolitas calcáreas y cuarzoarenitas con cemento calcáreo; en este sector es donde se ubican las mineralizaciones de esmeraldas de este distrito. (Reyes et al., 2006).

Respecto a la posición estratigráfica la Formación Rosablanca yace concordantemente sobre la Formación Cumbre, en la Plancha 170. El contacto con la suprayacente Formación Paja en el área no fue observado, pero se cree que es también concordante (Ulloa y Rodríguez, 1991).

Para Cardozo & Ramírez (1985), el contacto de la Formación Rosablanca con la Formación Ritoque es transicional entre micritas y lodolitas terrígenas.

La edad de depositación de esta formación aún no se tiene bien definida; estudios bioestratigráficos con amonitas indican edades Valanginiano- Hauteriviano inferior (Etayo en Guzmán, 1985), Hauteriviano-Barremiano (Morales et al., 1958) y límite con la suprayacente Formación Paja, Barremiano medio y superior – Aptiano inferior (Gaona et al., 2013).

7.2.1.2 Formación Paja (Kip)

Wheeler O.C., en Morales et al. (1958) definió esta unidad para referirse a una secuencia sedimentaria gruesa predominantemente de lutitas piríticas y micáceas de color gris oscuro a negro, dispuestas en capas delgadas con estratificación plana paralela a discontinua, con concreciones arenosas ligeramente calcáreas con fósiles principalmente de amonitas. Su nombre proviene de la quebrada La Paja afluente del río Sogamoso, en el Valle Medio del Magdalena. La sección tipo se localiza en la rivera norte de la quebrada La Paja en el sitio de confluencia con el río Sogamoso. (Morales et al., 1958).

La parte inferior de la unidad presenta intercalaciones de micritas negras en capas medianas a gruesas y en menor proporción interposiciones de lodolitas negras, cuarzoarenitas. La parte superior se caracteriza por lutitas poco carbonosas, finamente laminadas y presencia de nódulos de pirita muchos de ellos huecos; con algunas intercalaciones de arcillolitas carbonosas negras alternadas con capas de calizas meteorizadas.

Las sedimentitas de la Formación Paja en el área de Guane, reposan en contacto neto y sobre la última capa de biomicrita de la Formación Rosablanca (Zamarreño, 1963), contacto que consideran se mantiene en el área de la plancha 190; el contacto superior se marca en el tope de las sedimentitas de la Formación Paja y en la base de los paquetes de arenisca de la Formación Tablazo en contacto neto y concordante.

La Formación Paja tiene una edad desde el Hauteriviano hasta el Aptiano tardío (Etayo-Serna, 1968) y la base está representada por el Barremiano inferior de acuerdo con la distribución y asociación de especies de amonitas (Patarroyo, 1997).

7.2.1.3 Formación Tablazo (Kit)

Esta unidad se reconoce al oriente del municipio de Muzo, formando el núcleo del sinclinal de Los Almendros (plancha 189: D12, E12). El nombre de la formación fue dado por Wheeler, 1929 (en Morales et al., 1958) para designar una secuencia de 156 metros representada por calizas y lodolitas calcáreas, fosilíferas, masivas, con predominio de calizas en la parte alta y lodolitas calcáreas en la parte baja que afloran en la población de El Tablazo, en el lado Norte del río Sogamoso.

Morales et al. (1958) ubica estratigráficamente esta unidad sobre la Formación Paja y suprayacida por la Formación Simití y basado en su posición estratigráfica le asigna una edad Aptiano Superior a Albiano inferior.

Hubach (1953), por la vía Chiquinquirá-San Gil, llama a la secuencia de areniscas y calizas intercaladas con esquistos arcillosos “Conjunto San Gil” el cual descansa sobre los esquistos arcillosos del Aptiano y es suprayacido por el conjunto San Gil Superior y asigna una edad de Albiano. El mismo autor (1957) considera esta unidad equivalente a la caliza del Tablazo de la cuenca del Carare.

Julivert (1958), plantea la equivalencia de la secuencia del Aptiano superior – Albiano entre la parte alta del río Sogamoso (caliza del Tablazo), donde son bancos de caliza masiva y al Sur de San Gil, donde son intercalaciones de calizas y pizarras en bancos (caliza de San Gil).

Etayo (1968a) con base en fauna de amonitas colectada en el área de Sáchica-Puente Samacá considera la Formación San Gil Inferior (equivalente a la Formación Tablazo) como Aptiano Superior- Albiano.

7.2.2 Estratigrafía Local

En el área de influencia la secuencia estratigrafía local de más antiguo a más reciente va desde el Hauteriviano- Barremiano con la Formación Muzo, Aptiano tardío- Albiano temprano de la Formación Capotes, hasta Albiano medio alto – Albiano tardío alto con la Formación Pacho.

7.2.2.1 Formación Muzo (Hauteriviano – Barremiano)

La Formación Muzo es la unidad que aflora en el área de estudio (mina Puerto Arturo) y se localiza en la plancha 189: C11 y D11. Definida por primera vez en el trabajo de INGEOMINAS de Reyes (2006), la unidad está constituida por lodolitas calcáreas y no calcáreas, intercaladas con arenitas, limolitas y calizas de edad Hauteriviano – Barremiano con base a amonitas recolectadas en la formación (Etayo-Serna). Su contacto inferior es transicional rápido a neto con la Formación Furatena y su contacto superior es concordante-neto con la Formación Capotes.

Los sectores donde se encuentran buenos afloramientos de la Formación Muzo son al Occidente del municipio de Muzo en el área de las minas de esmeraldas de Puerto Arturo y sobre el flanco Oriental del Anticlinal de la Chapa-Borbur en las minas de esmeraldas de La Pita, Cunas, Totumos, Consorcio y Polveros.

El espesor medido en la sección tipo es de 160 metros; sin embargo, en la plancha 189, en el sector de Muzo (minas de Puerto Arturo, 189: C11 y D11), el espesor aproximado es de 300 metros según los cortes realizados sobre el mapa.

A continuación, se describe la columna levantada en la plancha 190 Chiquinquirá (vía Borbur-Pauna) por INGEOMINAS – GEOSEARCH LTDA (2005) que se propuso como sección tipo para esta unidad. (Anexo 2).

La parte inferior se caracteriza por lodolitas calcáreas y no calcáreas, color gris oscuro con intercalaciones de caliza micrítica, se observan nódulos de pirita y vetas de calcita paralelas y cortando la estratificación. Intercaladas con estas lodolitas se tienen capas de limolitas arenosas y arenitas cuarzosas atravesadas por vetas de albita y cuarzo. En la parte media del segmento se presentan lodolitas y limolitas albitizadas, algo calcáreas, en forma de lentes con una laminación ondulada no paralela; se observa una zona de brecha hidrotermal con mineralización de esmeralda y formación de vetas de calcita, albita, yeso y pirita. En la parte superior del segmento se encuentran arenitas de grano muy fino intercaladas con capas de lodolitas color gris oscuro y limolitas que contienen fauna representada en moldes de amonitas. Se presentan nódulos de pirita y vetas de calcita; finalmente el segmento culmina con una sucesión calcárea con intercalaciones de lodolitas calcáreas, caliza micrítica y arenitas dispuestas en capas medianas y delgadas.

7.2.2.2 Formación Capotes (Aptiano tardío – Albiano temprano)

La Formación Capotes fue definida en Reyes (2006) como una sucesión de arcillolitas, limolitas silíceas y en ocasiones calcáreas.

Cáceres & Etayo-Serna (1969), definen para la región de Apulo- Cundinamarca el miembro Capotes, que hace parte de la Formación Socotá constituido por una alternancia de lutitas y margas con concreciones fosilíferas de edad Albiano medio que descansa sobre shales

que conforman el Miembro medio de la Formación Socotá y es suprayacido por el nivel de shales denominado por Hubach (1931) como Nivel de Esferitas; para estos autores los miembros Capotes y Medio pasan lateralmente a shales. Etayo-Serna (1979), mantiene esta definición, pero le asigna a esta sucesión una edad Albiano temprano

En la región de Viotá hasta Pacho, Cardozo (1989), denomina informalmente “Shale de Socotá”, a una secuencia de arcillas, limolitas y shales calcáreos laminados localmente con vetas de yeso, nódulos de micrita y pirita. Para este autor, los shales se vuelven más silíceos en la parte superior; la edad asignada es Aptiano tardío – Albiano temprano. Acosta et al. (2001a), en la cartografía de la plancha 227 La Mesa, agrupan el miembro medio, el Miembro Capotes y el Horizonte de Esferitas como Formación Capotes, la cual es limitada en la base por la Formación Socotá y en el techo por la Formación Hiló.

Cerca al área de estudio plancha (189: C12, D12), al Oriente del municipio de Muzo fue levantada una columna por Reyes & Montoya (2006) de 823 metros, en la vía de conduce de Muzo a Chiquinquirá. (Anexo 3). la cual se describe a continuación:

En la parte basal del primer segmento (240m) se presentan arcillolitas de color gris oscuro, con laminación plana paralela a ondulosa; la parte media se compone de laminaciones finas de arcillolitas y lodolitas con minerales de pirita bien formados; la parte superior son arcillolitas con laminación ondulosa. El segundo segmento (180m) se compone de arcillolitas y limolitas arcillosas y arenosas dispuestas en capas medianas a gruesas con laminación continua plano-paralela y el tercer segmento (403m) presenta intercalaciones de arcillolitas y lodolitas calcáreas de color gris oscuro con laminación plana paralela y concentraciones de óxidos de hierro.

Respecto a su posición estratigráfica limita en la parte inferior con la Formación Muzo de manera concordante-neto, sin embargo y considerando la edad de la Formación Muzo como Barremiano y la edad de la parte más baja de esta unidad como Aptiano tardío, se debe presentar un hiato correspondiente al Aptiano inferior. El límite superior con la Formación Hiló es concordante-transicional, pero en el área de la plancha 189 (D12) el límite superior se da con la Formación Tablazo de manera concordante-neto. La edad de la Formación Capotes se determinó mediante fósiles de amonitas que permitieron asignar una edad Aptiano tardío-Albiano temprano (Etayo-Serna).

7.2.2.3 Formación Pacho (Albiano medio alto – Albiano tardío alto)

La Formación Pacho fue definida en Reyes (2006) como una secuencia de limolitas, arcillolitas y arenitas, que se encuentran suprayaciendo rocas de la Formación Hilo en contacto concordante con la estratificación; de edad Albiano medio alto hasta Albiano tardío alto con base a amonitas recolectadas en esta unidad (Etayo-Serna). Se expone en la plancha 189 en los alrededores de los municipios de Quipama y la Victoria, en los sinclinales de Quipama y Santa Helena y en el Anticlinal de La Victoria.

En el mapa geológico de la plancha 189, Rodríguez & Ulloa (1994), consideran esta unidad como una variación facial de la Formación Areniscas de Chiquinquirá del Albiano tardío-Cenomaniano; también denominan informalmente un “conjunto arenoso lutítico” y lo interpretan como un cambio facial de la Formación Tablazo, pero según Reyes (2006) este conjunto es una unidad más joven, de edad Albiano medio tardío a Albiano tardío de la Formación Pacho.

Reyes (2006) describe la litología de la Formación Pacho que se expone desde el río Minero hacia las veredas Sorquecito y Sorque Grande en Boyacá, donde se alcanzan a diferenciar tres paquetes duros que forman relieve constituidos por limolitas y capas de limolitas arenosas grises y micáceas. En los paquetes arenosos superiores se presentan amonitas y bivalvos; se observa cloritoide en el sector más oriental de la unidad. Al igual se presentan tres paquetes blandos que forman valles en la Vereda Barro Blanco – Boyacá, constituidos por arcillolitas grises, con laminación continua a discontinua, en ocasiones silíceas, que parten en lajas muy delgadas.

7.3 Geología local

En el área del título minero de la mina Puerto Arturo afloran secuencias sedimentarias marinas de lutitas correspondientes a la Formación Muzo y la Formación Capotes donde se han identificado los siguientes tipos de roca:

7.3.1 Lutitas calcáreas

Unidad de lutitas calcáreas color gris oscuro a negro, carbonosas con laminación plana paralela y masivas, pertenecientes a la Formación Muzo dispuestas en capas de espesores variables (centímetros a metros), afectada en varios sectores por pliegues, fallas y estructuras como vetas y vetillas de calcita. Esta unidad aflora en gran parte de los frentes de explotación y es de gran importancia dado que constituyen las principales rocas donde se encuentra la mineralización de esmeraldas.

En un estudio realizado por López (1995) se determinó que el espesor aproximado para esta unidad es 50 m, pero el espesor de la secuencia tectónica y no de la secuencia sedimentaria.

En efecto, los cabalgamientos amplían la secuencia sedimentaria por lo que el espesor medido es después al episodio de deformación.

Figura 2.

Muestra de roca del pozo PL_27_47_PA_120_NORTE_-50



Nota. Secuencia de lutitas negras calcáreas, con grado de fracturamiento variable.

7.3.2 Lutitas silíceas gris oscuro a negro

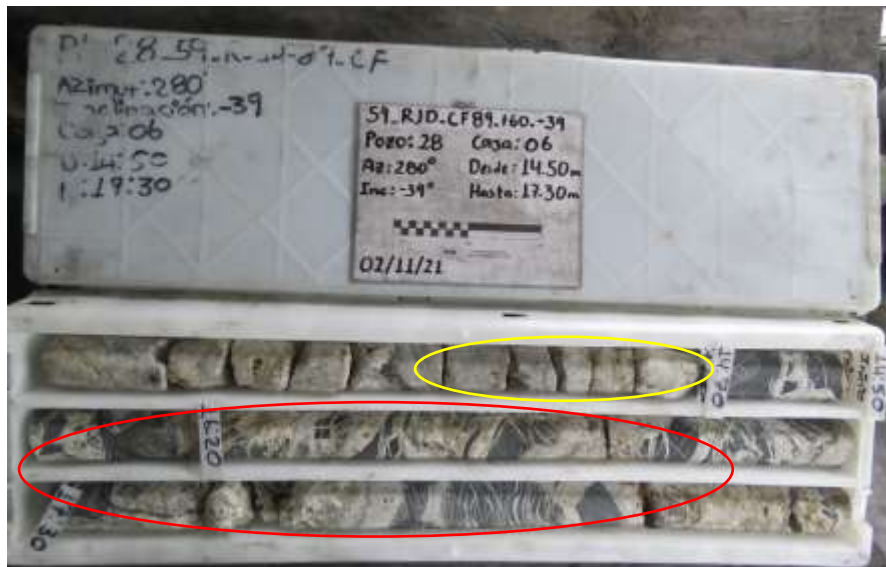
Secuencia de lutitas silíceas color gris oscuro a negro, carbonosas pertenecientes a la Formación Capotes, en general la roca es masiva, levemente fracturada, con dureza alta. Se encuentra afectada por algunas vetas y vetillas de calcita fibrosa y nódulos de pirita. Esta unidad es pobre en mineralización de esmeraldas.

7.3.3 Lutitas silíceas gris claro

Esta unidad es denominada informalmente como la zona de la “Arenera” y se caracteriza por presentar lutitas silíceas color amarillo a gris claro, no carbonosas afectadas en algunos sectores por brechas hidrotermales compuestas por fragmentos de cristales de dolomita, ankerita (dolomita en hierro) piritita y óxidos de hierro y zonas dolomitizadas como se observa en la figura 3.

Figura 3.

Muestra de roca del pozo PL_28_59_RJD_CF89_+60_-39.



Nota. Brecha hidráulica silícea (resaltado en rojo) y veta de Dolomita de 70 centímetros de espesor (resaltado en amarillo).

Esta secuencia de lutitas calcáreas y silíceas se encuentran intensamente plegadas y falladas; de igual manera presentan vetas y vetillas de calcita que rellenan parcial o totalmente las fracturas de los sedimentos y zonas de brecha donde ocurre la mineralización de esmeraldas.

Según Branquet (1995) las **trampas para la mineralización** de esmeraldas son las siguientes:

7.3.4 Brechas tectónicas

Estas brechas son de composición calcárea y silíceas muy carbonosas, formadas a lo largo de cabalgamientos y anticlinales relacionados a cabalgamientos y que tienen la particularidad de estar cementadas por minerales hidrotermales. Se presentan fragmentos negros de lutitas calcáreas y silíceas y fragmentos blancos de lutitas hidrotermalizadas (caolín), embebidos en una matriz formada por granos muy finos que proviene de la trituración de las lutitas negras. Estos fragmentos presentan tamaños entre 1 a 40 centímetros, se encuentran deformados y fracturados y muestran movimientos de translación y de rotación. El cemento se compone de los mismos minerales que la paragénesis hidrotermal albita, calcita, pirita y dolomita.

7.3.5 Brechas hidrotermales

Este tipo de brechas con fragmentos de roca angulares se forman por la interacción fluido-roca, donde estos fluidos migran formando una red de vetillas y vetas que atraviesan la roca (lutitas calcáreas o silíceas). La fracturación que genera las brechas hidráulicas no es homogénea por lo que el tamaño y espesor de las vetillas es variables; minerales como calcita, dolomita, pirita, fluorita, esmeralda, entre otros se forman en este sistema de vetas, vetillas y cavidades.

Las brechas hidrotermales se desarrollan donde la presión de los fluidos es fuerte, en lugares como los núcleos de los pliegues debido a una presión de fluidos superior a la presión de la roca encajante.

7.3.6 Vetas y vetillas

Se pueden distinguir dos tipos; las vetas paralelas a los planos de estratificación rellenas principalmente por calcita fibrosa y pirita. Frecuentemente en los bordes de estas vetas se desarrolla fuchsita una variedad de la moscovita. Algunas de estas vetas presentan una segunda etapa de apertura donde cristaliza calcita romboédrica y en ocasiones esmeralda. El otro tipo de vetas son las que cortan la estratificación y presentan un relleno de calcita fibrosa, aunque generalmente corresponde a calcita romboédrica, también hay cristalización de pirita y fuchsita al nivel de las paredes de las vetas.

El espesor de estas estructuras no es una condición que determine la presencia de esmeralda ya que tanto en las vetas (>1 cm) como en vetillas (<1 cm) se puede llegar a dar mineralización, lo importante es que se den las condiciones para su formación.

Otras estructuras donde se puede llegar a dar mineralización son: embrechados, patinas, stockwork y fragmentos de vetas.

7.4 Geología estructural

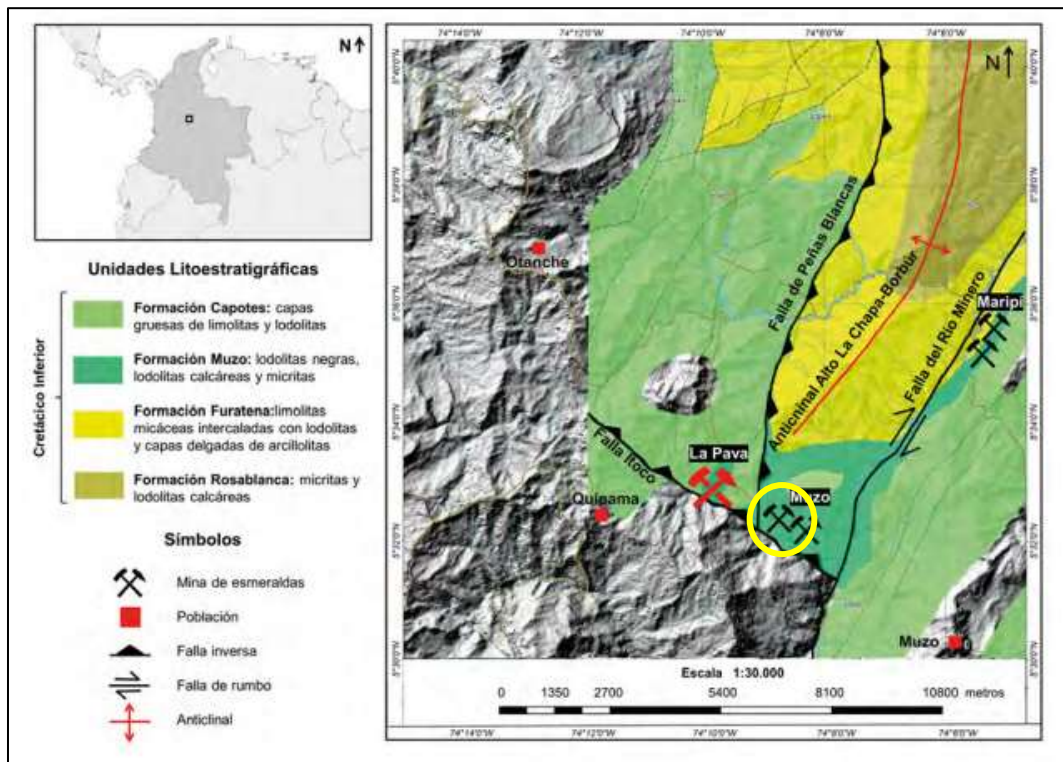
El régimen tectónico del Cinturón Esmeraldífero Occidental es compresivo y transpresivo. Este último se manifiesta por fallas inversas con movimientos transcurrentes. Existe un plegamiento muy marcado a nivel regional y local. Regionalmente se presentan sinclinales abiertos, poco deformados y con cierres estructurales, y a escala de afloramiento en las zonas de mineralizaciones de esmeraldas se presentan anticlinales con cierres asimétricos y apretados. (Reyes & Montoya et al., 2006).

Los planos de falla en general no se encuentran mineralizados y las brechas que normalmente se reconocen en las minas de esmeraldas son de origen hidrotermal, pero se pueden confundir con las tectónicas cuando una falla está afectando una zona mineralizada, que en algunos casos repite la secuencia. Por lo observado en campo las fallas son posteriores a la mineralización de esmeraldas, así coincidiendo con áreas mineralizadas. (Reyes & Montoya et al., 2006).

Las unidades del área de estudio se encuentran afectadas en gran medida por deformación tectónica reflejada en plegamientos intensos y fallas, debido a la composición lodosa de las rocas y su comportamiento dúctil. En la zona los principales rasgos tectónicos los constituyen el Anticlinal de La Chapa-Borbúr, Sinclinal de Muzo, Santa Helena y Coscuez, La Falla del Río minero, de carácter regional, es de tipo compresional, presenta un buzamiento hacia el Este y limita el área de estudio al Oriente, las Fallas Peñas Blancas y Falla Itoco se encuentran limitando la zona al Occidente y Sur. (Figura 4).

Figura 4.

Mapa geológico generalizado con los distritos mineros de Muzo-Quipama y Maripí.



Nota. La ubicación de la mina Puerto Arturo esta señalado en amarillo. Modificado de González-Durán et al. (2019).

A continuación, se presentan los pliegues y fallas principales del yacimiento de la mina Puerto Arturo; estas descripciones estructurales están basadas en el trabajo “Geología del Cinturón Esmeraldífero Occidental planchas 169, 170, 189 y 199” publicado por INGEOMINAS (Reyes & Montoya et al., 2006).

7.4.1 Anticlinal La Chapa- Borbúr

Tiene una dirección entre Norte- Sur N45°E, una longitud de 40 km y buzamiento de superficie de charnela 80°NE. En su núcleo aflora la Formación Rosablanca, la cual tiene un

cierre hacia el sur, los flancos están en la Formación Furatena y está limitado por la Falla del Río Minero al Oriente y al Occidente por la Falla de Peñas Blancas y al Sur termina en la Falla de Itoco.

7.4.2 Sinclinal y Anticlinal de Muzo

El nombre se toma de Bürgl (1956); estas dos estructuras se ubican en el valle de la localidad de Muzo y se consideran en conjunto por estar contiguas y por qué sus núcleos están en la misma unidad. Son aproximadamente simétricas pero el nivel de erosión más fuerte, esta sobre el flanco Occidental del anticlinal que expone las rocas de la Formación Muzo y en el flanco Oriental se encuentran rocas de la Formación Capotes.

El Sinclinal de Muzo se encuentra al Oriente del área y se encuentra limitado al Occidente por el sistema de fallas del Río Minero que lo separan del Anticlinal de La Chapa-Borbúr.

7.4.3 Sinclinal de Coscuez

Esta estructura se extiende desde la Falla Itoco al Sur, hasta la quebrada Miocá al Norte; tiene una amplitud de 3 Km y longitud de aproximadamente 8 Km. Es una estructura simétrica con cierres perfectos en la Formación Hiló y hacia el Norte se presentan algunos pliegues locales en la Formación Capotes.

El Sinclinal de Coscuez se localiza en el extremo NW del área y se encuentra afectado por algunas fallas las cuales cortan transversalmente la estructura y desplazan su parte Norte en dirección NE.

En el área de estudio es notorio el predominio del fallamiento sobre el plegamiento. Las fallas son mayoritariamente inversas o de cabalgamiento con vergencia al W y presentan tres tendencias principales de fallamiento y fracturamiento NE-SW, NW-SE y E-W.

7.4.4 Falla del Río Minero

Su nombre deriva del río Minero el cual corre en la misma dirección de la falla N35°E. Corresponde a una falla de cabalgamiento con vergencia al Occidente, en donde pone en contacto rocas de la Formación Rosablanca con rocas de la Formación Paja. Un rasgo notable se presenta en los cerros Fura y Tena, constituidos en parte por rocas calcáreas de la Formación Rosablanca, los cuales fueron elevados dentro de la Formación Furatena por efecto de la falla, con un sentido dextral.

7.4.5 Falla de Peñas Blancas

Esta falla de cabalgamiento se extiende desde la plancha 170 Municipio de La Belleza, pasando por la zona minera de Muzo hasta terminar al Sur en la Falla Itoco. Tiene una dirección preferencial N20°E con vergencia al W, pero al presentar sinuosidad puede llegar a N40°E. Cabalga rocas de la Formación Rosablanca, Furatena y Arcabuco. Al Norte tiene un comportamiento dextral.

7.4.6 Falla de Itoco

Falla transversal con orientación N50°W, que se desprende de la Falla Tambrías y va a lo largo de la quebrada Itoco, bordeando las zonas mineras de Muzo y Las Pavas. Esta falla tiene un movimiento sinextral y pone en contacto rocas de la Formación Muzo y la Formación Capotes.

7.5 Características generales de la esmeralda

La esmeralda es una variedad verde del Berilo $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$, el cual corresponde a un silicato de estructura anular del grupo de los ciclosilicatos que están formados por anillos de tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ enlazados con una relación Si: O=1:3 (Hurlbut & Klein, 1984).

El color de la esmeralda se obtiene a partir de la sustitución de Aluminio (Al) por cationes pesados como el Cromo (Cr^{3+}) y el Vanadio (V^{3+}) de lo que resulta la esmeralda $\text{Be}_3(\text{Al}, \text{Cr}, \text{V})_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$. El Berilo libre de cromóforos es incoloro (goshenita), pero las diversas variedades del mismo, obtenidas mediante la incorporación de iones de diferentes elementos dentro de su red cristalina, hace que sus variedades presenten diversas coloraciones. (Figura 5).

Figura 5.

Principales variedades del Berilo

Elementos cromóforos	Color Generado	Nombre de la Variedad
Cr y/o V	VERDE VIVO	Esmeralda
Fe	VERDE OPACO	Berilo Verde
Fe	AZUL	Aguamarina
Fe	AMARILLO	Berilo Dorado
Mn	ROSADO	Morganita
Mn	ROJO	Bixbita

BERILO +

Nota. Se especifican los elementos que generan el color (cromóforos). Tomado de Carrillo (2007).

En la tabla 1 se describen las principales propiedades físicas de la esmeralda y en la tabla 2 sus propiedades ópticas.

Tabla 1.*Principales propiedades físicas de las esmeraldas*

Propiedad	Definición	Característica en la esmeralda
Fragilidad	Facilidad de fragmentarse ante un impacto	Muy alta; manipúlense con cuidado
Anisotropía	Transmisión interna no homogénea de estímulos eléctricos o luminosos aplicados desde el exterior	Notoria
Refracción	Desviación en la dirección de un rayo de luz cuando el mismo pasa de una sustancia a otra	Cercana a 1,575
Hábito	Forma física del cristal, que refleja las características internas de su estructura	Generalmente prismas hexagonales.
Presentación	Forma como se encuentran en los yacimientos o en las zonas productivas de las minas	Generalmente en pequeñas bolsadas dentro de vetas delgadas o en zonas de intenso fracturamiento; ver capítulo 3
Densidad	Relación entre el peso y el volumen de un objeto determinado. Se expresa generalmente en g/cm ³ o en su equivalente: tn/m ³	2,63 a 2,8 g/cm ³
Dureza	Resistencia que presenta un material a ser rayado. Generalmente se utiliza la escala de "Mohs", que va desde 1, para el mineral talco (muy blando), hasta 10 para el diamante (muy duro).	7,5 a 8
Fractura	Forma de las superficies que se desarrollan tras una rotura del cristal	Concoidea
Raya	Color de las pequeñas partículas que se desprenden del cristal al ser frotado contra un material de mayor dureza	Blanca

Tomado de Carrillo (2007).

Tabla 2.*Principales propiedades ópticas de las esmeraldas.*

Propiedad	Definición	Característica en la esmeralda
Color	Radiación cromática complementaria que refleja un cuerpo ante un estímulo luminoso	Verde, verde-amarillento o verde azulado en respuesta a la luz día
Fluorescencia	Respuesta cromática de un objeto cuando es expuesto a radiaciones ultravioleta	Variable en intensidad. Generalmente entre rosada y roja.
Transparencia	Facilidad con la que un objeto es atravesado por la luz	Variable. Entre transparente a translúcida
Brillo y lustre	Aspecto de las superficies del cristal natural	Vítreo
Efecto ojo de gato	Reflejo que semeja una banda luminosa a través del mineral	Se presentan ocasionalmente cuando la esmeralda es tallada en cabujón. Ver capítulo 4.
Asterismo	Múltiples reflejos cruzados en forma de estrella	

Tomado de Carrillo (2007).

7.6 Tipo de depósito

Para los depósitos de esmeraldas en Colombia se han propuesto dos teorías.

7.6.1 Origen ígneo

Restrepo (1961) & Hall (1976), plantean que los fluidos mineralizantes tienen una composición geoquímica de origen ígneo- pegmatítico, con minerales primarios como el cuarzo y feldespatos, accesorios como la parisita, apatito y fluorita, minerales de reemplazamiento como la calcita, dolomita, barita y pirita y de alteración limonita, azufre y sulfatos de cobre.

Beuss (1969) sugiere para las esmeraldas de Muzo un origen a partir de soluciones hidrotermales ricas en carbonatos en donde el Berilo se transporta en soluciones carbonatadas. Beuss & Mineev (1972) afirman una procedencia para los fluidos de soluciones epitermales ricas en Berilo y tierras raras que provienen de fuentes endógenas y profundas, donde la esmeralda precipita en filones de baja temperatura.

7.6.2 Origen sedimentario: interacción roca caja (carbonosa – calcárea) con fluidos hipersalinos de procedencia evaporítica

Escovar (1975) sugiere un origen autóctono donde los fluidos mineralizantes se generaron por la interacción de aguas meteóricas y connatas en las lutitas negras, lixiviando Berilo y Cromo de las rocas encajantes. Al igual que Medina (1970) planteo el origen de la mineralización de esmeraldas por un mecanismo autóctono, donde la cristalización se da a partir de los elementos lixiviados de las lodolitas negras encajantes.

Esclarecer la génesis de las esmeraldas colombianas no ha sido un proceso sencillo, ya que este tipo de mineralización no ocurre como la mayoría de los depósitos esmeraldíferos del mundo y solo hasta inicios de los años 90 los autores (Ottaway, 1991; Giuliani et al., 1992; Cheillett et al., 1994; Ottaway, 1991; Ottaway et al., 1994; Giuliani et al., 1995 a y b) realizaron estudios de microtermometría en inclusiones fluidas y análisis de isótopos estables, estableciendo el origen, naturaleza de fluidos y temperaturas de entrapamiento; además realizaron estudios de la maduración de la materia orgánica para las rocas que hospedan la mineralización, generando un modelo genético que se considera como el más aproximado a la realidad.

El modelo genético sedimentario-hidrotermal para la mineralización de las esmeraldas en Colombia propuesto por Cheillett & Giuliani (1996) se divide en dos etapas:

Etapa 1 primero ocurre un tectonismo compresional que provocó la formación de niveles de despegue en los bordes de la Cordillera Oriental y en las secuencias de lutitas negras de edad cretácica, luego se da la infiltración de fluidos hidrotermales a lo largo de los planos de falla y disolución de capas evaporíticas presentes. Asociado a este proceso se da una fuerte interacción fluido-roca y el desarrollo de un tipo de metasomatismo con albitización, carbonatización y lixiviación de Be, Al, Si, Cr, V y REEs y desarrollo de vetas esteriles de calcita fibrosa y pirita.

Etapa 2 en esta etapa se da la formación de brechas a lo largo de cabalgamientos y anticlinales relacionados a cabalgamientos. Se produce plegamiento disarmonico y brechas hidráulicas por el incremento en la presión del fluido hidrotermal, en esta etapa hay cambios en la geoquímica del fluido y las vetas presentan cambios mineralógicos con la presencia de calcita, dolomita, pirita, cuarzo, albita, moscovita, fluorita, parisita y esmeralda.

Las condiciones de formación de las esmeraldas se dieron a una temperatura de 320° C más o menos 40°C, presiones mínimas de confinamiento entre 900 y 1000 bares y profundidades de 2 a 7 km.

Los estudios de microsonda y de inclusiones fluidas de Cheilletz et al. (1994) demostraron que las mineralizaciones se producen antes de los procesos mayores de exhumación de la cordillera Oriental, ya que el inicio de la exhumación puede ser un factor capaz de detener los procesos mineralizantes.

7.7 Mineralización

El yacimiento de la mina Puerto Arturo ha sido afectado en gran medida por deformación tectónica evidenciado en plegamiento y fallamiento de la secuencia de lutitas carbonosas presente en la zona, formando así zonas de ruptura. Estas deformaciones fueron fundamentales en el proceso de mineralización de esmeralda pues la ruptura y fracturamiento incrementaron la porosidad primaria de las rocas ya consolidadas, generando espacios vacíos que fueron aprovechados por fluidos hidrotermales cargados con diferentes compuestos químicos para permitir la formación de esmeralda en vetas de calcita, brechas tectónicas y brechas hidrotermales.

Comúnmente la esmeralda está acompañada de minerales como calcita romboédrica, dolomita, albita, caolín, cuarzo, fluorita, parisita, fuschita y sulfuros como pirita y calcopirita.

Teniendo en cuenta la tesis realizada por Ottaway (1991) sobre la geoquímica de los yacimientos de esmeraldas en Muzo- Boyacá los minerales indicadores de la mineralización de esmeralda son la Parisita y la Fluorita debido a su estrecha asociación con la piedra preciosa.

8. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

A continuación, se da una explicación detallada de las diferentes actividades que se realizaron durante el periodo de la práctica académica comprendido entre el 01 de octubre de 2021 y el 30 de marzo de 2022, las cuales aportaron gran conocimiento geológico para el desarrollo de la misma.

Tabla 3.

Cronograma de actividades desarrolladas durante la práctica académica.

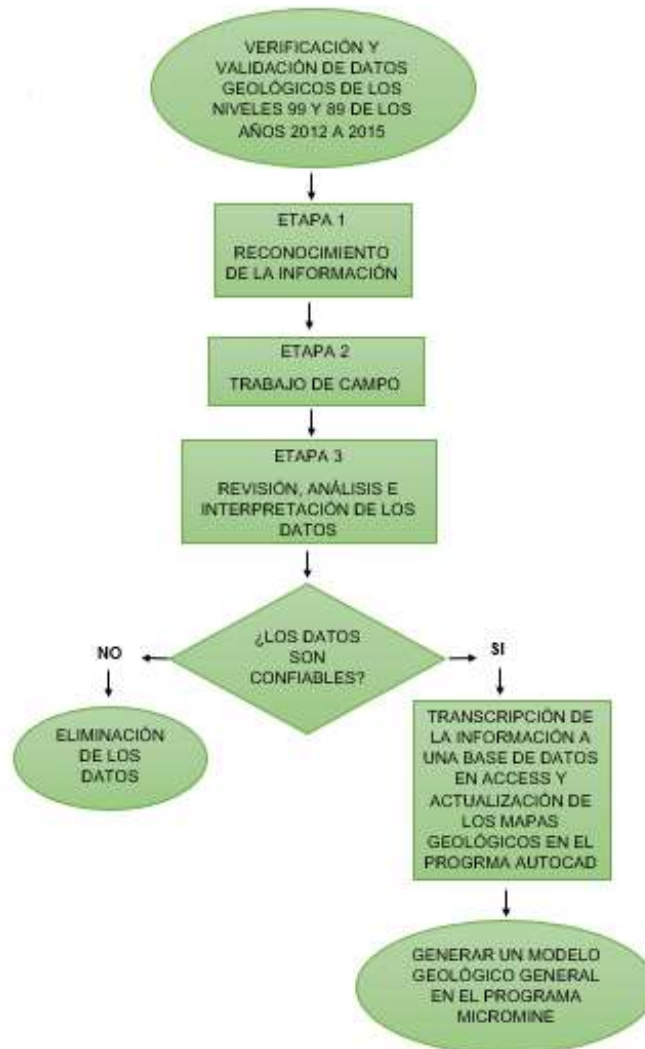
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																								
ACTIVIDADES A REALIZAR	oct-21				nov-21				dic-21				ene-22				feb-22				mar-22			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Validación de datos, verificación de coordenadas y actualización de mapas geológicos nivel 99																								
Validación de datos, verificación de coordenadas y actualización de mapas geológicos nivel 89																								
Validación de datos, verificación de coordenadas y actualización de mapas geológicos nivel 89																								
Transcripción de descripciones geológicas nivel 89 y nivel 99																								
Transcripción de descripciones geológicas nivel 89 y nivel 99																								
Modelo geológico general, reporte de resultados e informe final																								

8.1 Verificación, validación y transcripción de los datos geológicos de los niveles 89 y 99

8.1.1 Metodología

Figura 6.

Diagrama flujo de la metodología aplicada para el trabajo de grado.



A continuación, se explica a detalle la metodología aplicada para el desarrollo del presente trabajo de grado.

8.1.1.1 Etapa de reconocimiento de la información

Esta etapa consistió en hacer una recopilación de la información geológica y revisión bibliográfica que fue de apoyo al momento de elaborar el presente trabajo de grado.

8.1.1.2 Etapa de trabajo de campo

Se realizó una serie de recorridos a interior mina con la finalidad de visitar los frentes de trabajo y hacer el respectivo levantamiento geológico.

Al llegar al frente se hace una descripción detallada, se registra en la libreta de campo y finalmente esta información se lleva a la base de datos, para la actualización de los mapas geológicos.

La información que se recopila durante el levantamiento geológico es la siguiente:

- **Nombre de la mina:** ubicación del sector donde se está adelantando la labor minera.
- **Fecha:** día, mes y año del momento de la visita.
- **Ubicación del frente:** cada frente presenta una placa de amarre que se instala cada dos puertas. Las placas se marcan con las iniciales de la mina donde se encuentra ubicada y el consecutivo. Ejemplo: PTO 35 (Puerto Arturo, consecutivo 35.) Con el distanciómetro que es un instrumento electrónico de medición, se toma la distancia en metros del avance desde la placa hasta el frente de trabajo.

- **Unidad geológica:** tipo de roca que se observa en el frente de trabajo.
- **Espesor de las capas:** espesor real de las unidades litológicas.
- **Color:** tono de la roca.
- **Resistencia:** se define que tan dura o blanda esta la roca.
- **Reacción HCl:** se define la presencia de carbonatos en la roca.
- **Observaciones:** se describe el grado de fracturamiento de la roca, si hay presencia de fallas, diaclasas o contacto entre unidades.
- **Dirección del frente:** con ayuda de la brújula se toma el dato de hacia dónde se está trabajando el frente.
- **Vetas y vetilleo:** si en el frente se observa este tipo de estructuras, se debe tener especial atención ya que es aquí donde se da la cristalización de esmeraldas, por lo que se hace una descripción detallada teniendo presente la disposición ya sea paralela o perpendicular a la estratificación, aleatoria, inclinada, subhorizontal, o vertical, mineralogía, textura, ya sea arenosa, cristalina, lechosa o fibrosa, ubicación (se especifica en que parte del frente se encuentra, en la parte derecha, izquierda o en el centro), continuidad de la estructura y espesor.
- **Flujo de agua:** si hay presencia de agua o no.
- **Toma de datos estructurales:** estratificación, fallas, diaclasas, vetas o vetillas.
- **Producción:** si al momento de la visita el frente presenta producción, se hace el registro en la libreta de campo. La producción puede ser Tula, lona o carga precintada.
- **Registro fotográfico:** Se toman fotografías del frente, hastial derecho y hastial izquierdo teniendo presente que al momento de tomar la foto se observe el marco de la puerta y la placa instalada, al igual que tener un buen enfoque, para que al momento de hacer la

revisión y llevar la información a la base de datos se tenga claro que foto corresponde al frente, al hastial derecho y al hastial izquierdo, y determinar detalles que pudieron no ser observados al momento de la visita y que pueden indicar algo importante.

- **Coordenadas:** georreferenciación del frente.
- **Esquema:** se realiza un esquema a mano del frente, donde se resaltan estructuras como planos de falla, vetas, vetillas o algún contacto entre unidades.
- **Cargar la información revisada en campo a la base de datos geológica en Access.**
- **Actualizar los mapas geológicos en AutoCAD.**

8.1.1.3 Etapa de revisión, análisis e interpretación de la información


Este procedimiento consistió en hacer la revisión detallada de cada descripción geológica de los niveles 89 y 99 de las minas Catedral y Puerto Arturo respectivamente; estos datos se encuentran almacenados en formato Excel, (Figura 7) y algunos en formato Access que es la base de datos que actualmente es usada para almacenar las descripciones geológicas.

Para realizar el análisis e interpretación de los datos se usó el programa Excel como herramienta de apoyo para procesar y presentar los datos.

Esta actividad fue la más importante dentro del proceso de validación y verificación de los datos, ya que al hacer un control de calidad de la información se cumple con la finalidad que es obtener una base de datos confiable, que permita realizar una correcta interpretación geológica del yacimiento.

Figura 7.

Formato Excel para la descripción geológica de frentes

	MINERIA TEXAS COLOMBIA		Versión: 001
	Formato de Descripción Geológica de frentes		
	Formato GEO-01		
Fecha:	Clavada:		
Ficha:	Frente:		
Coordenadas N:	E:	Cota:	
Número de placa:			
Ing. Geóloga:			
Descripción general de la (s) roca (s):			
Color:		Dureza:	
Estratificación y espesor de cada		Rumbo y Buzamiento:	
Contactos litológicos:		Estructuras Geológicas:	
Zona productiva:		Grado de Meteorización:	
Descripción de minerales (tamaño, color, forma de cristales, reacción HCL, dureza, etc)			Alteraciones:
Muestras recolectadas:		Registro fotográfico o croquis:	
Observaciones:			

Tomado de Base de datos, Área de Geología Compañía Esmeraldas Mining Services S.A.S.

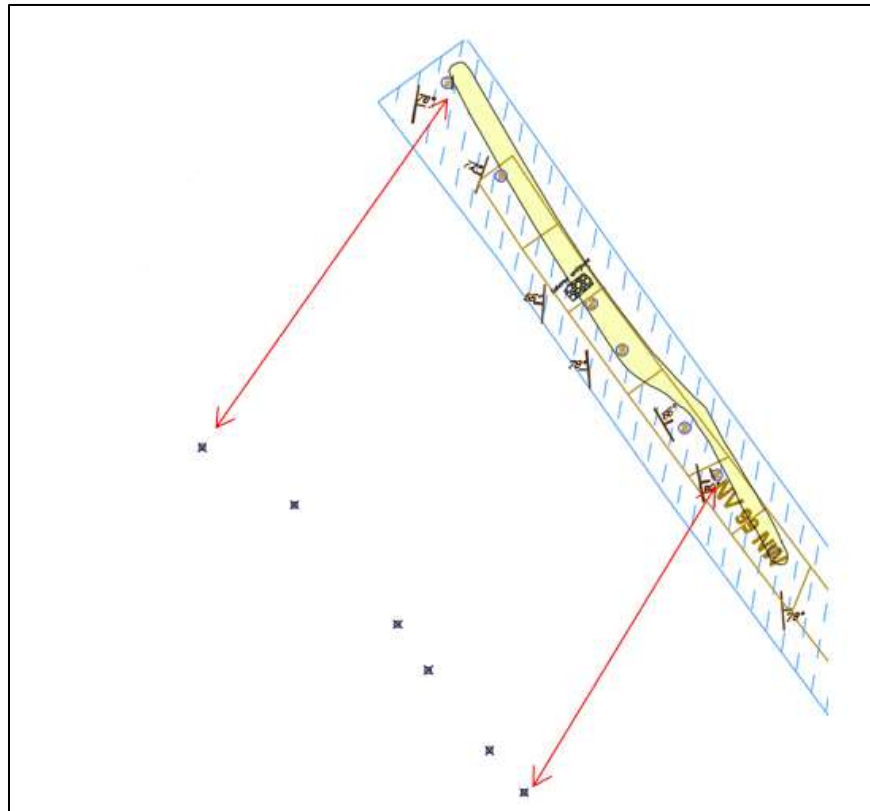
- **Correlaciones coordenadas descritas en formato Excel y coordenadas de los planos de AutoCAD nivel 99**

Un sistema de coordenadas es la forma que se tiene de relacionar o identificar la localización de un punto en un plano con su posición en el mundo real.

Tener la posición exacta de cada frente de trabajo de la mina, es fundamental ya que esto permite ubicar de manera correcta las unidades geológicas, las estructuras y las zonas de interés productivo en los mapas geológicos.

Figura 8.

Ejemplo de desfase de coordenadas de las placas ubicadas en la parte norte del nivel 99.



Lo primero que se realizó fue la verificación de las coordenadas de 49 datos de placas y deltas descritos en formato Excel del nivel 99 de la mina Puerto Arturo y se comparó con la ubicación de estos datos en el plano de AutoCAD, Para determinar la correlación de la información, pero al momento de graficar los puntos en el plano se encontraron desfases en X de hasta 6.326 metros, Y de hasta 9.775 metros, Z de hasta 5.132 metros (Figura 8).

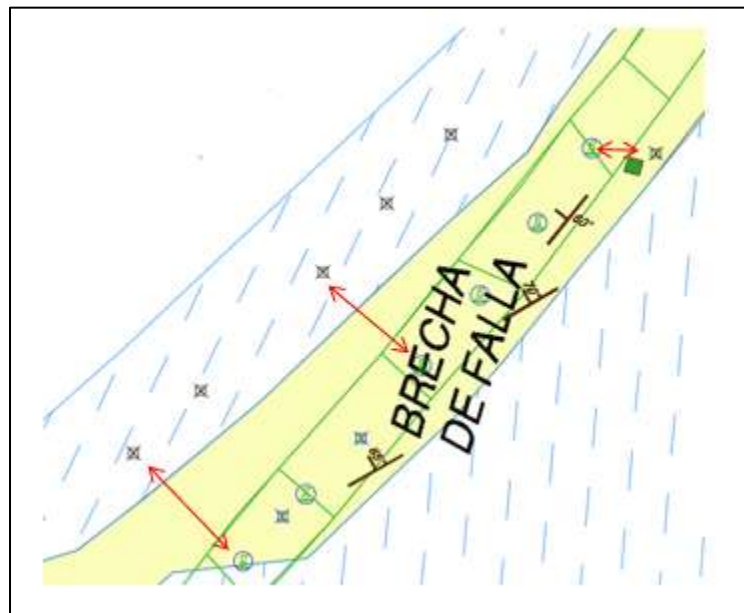
El desfase que se presenta con las coordenadas se pudo deber a la diferencia de levantamientos topográficos realizados en años anteriores.

Al finalizar la revisión y verificación se tomaron las coordenadas del plano y se llevó a una base de datos geológica en formato Access.

- **Correlaciones coordenadas descritas en formato Excel y coordenadas de los planos de AutoCAD nivel 89**

Figura 9.

Ejemplo de desfase de coordenadas de las placas ubicadas en la parte central del nivel 89.



- **Verificación de placas y deltas**

En el proceso del levantamiento geológico de los frentes en la mina, se usa como identificador placas y deltas que sirven como guía para saber la ubicación y los avances que han tenido los frentes.

En los recorridos diarios en mina que realizan los geólogos, se van instalando placas de amarre cada dos puertas y con ayuda del distanciómetro se toma la distancia en metros entre las placas, al igual que la distancia de los deltas que se mide desde la última placa instalada hasta el frente de trabajo, para así tener un control de los avances.

Con las medidas que fueron tomadas en campo finalmente se hace la actualización de los mapas geológicos en AutoCAD, ubicando la placa instalada con la abreviatura del nombre de la mina y el consecutivo, ejemplo: PTO 35 (Puerto Arturo, consecutivo 35.) y el delta con la fecha de la visita y un hipervínculo con el registro fotográfico del frente, para así obtener una mayor calidad de la información recopilada en campo.

Lo que se realizó en esta etapa del trabajo fue un comparativo de las placas y deltas del nivel 89 y 99 de las minas Catedral y Puerto Arturo de la base de datos en formato Excel, con las que se encuentran ubicadas en el plano geológico de AutoCAD, para establecer la relación entre estos datos y corroborar si coincidían o no en nombre, ubicación y fecha, y realizar las correcciones pertinentes.

- **Validación de las descripciones geológicas**

Se hizo una revisión, análisis e interpretación de todos los datos geológicos que fueron tomados por diferentes geólogos del nivel 89 y nivel 99 de las minas Catedral y Puerto Arturo respectivamente.

Para lo anterior se realizó un análisis comparativo de los datos registrados en formato Excel con la información digitalizada en los mapas geológicos en AutoCAD como litología, contactos entre unidades, datos estructurales (estratificación, disposición de vetas y planos de falla), estructuras como vetas, vetillas, stockwork (mineralogía, orientación y espesor), producción, dirección del frente y labores antiguas; con el objetivo de determinar la relación entre los datos y realizar las debidas correcciones.

Al momento de realizar la validación de los datos geológicos de los años 2012 a 2015 se identificaron algunos errores en la información almacenada por lo que se realizaron correcciones y en los casos de duda se señalaron y posteriormente, con el apoyo del gerente y jefe del área se realizaron las modificaciones pertinentes.

- **Revisión del registro fotográfico**

Al momento de realizar la validación de los datos geológicos, el registro fotográfico fue un elemento fundamental ya que se pudo realizar el análisis comparativo de las descripciones litológicas, estructuras, disposición de las capas, entre otros, con lo que se observaba en la fotografía. Por lo que se hizo una revisión detallada para hacer una correcta actualización de los mapas geológicos y obtener resultados confiables.

8.1.1.4 Etapa de transcripción de los datos geológicos del nivel 89 y nivel 99

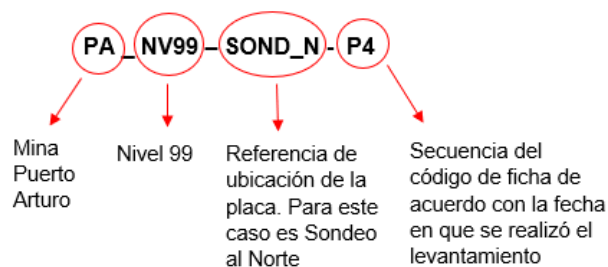
Teniendo como base los datos validados, verificados e interpretados se realizó la transcripción de los mismos a una base de datos en el programa Access, considerando la siguiente información:

- **Fecha:** día en el que se puso la placa y se hizo la descripción.
- **Nombre de la mina:** en el proyecto se trabajaron las minas Puerto Arturo y Catedral.
- **Realizado por:** nombre del geólogo que realizó el levantamiento geológico.
- **Código de ficha:** es el identificador de cada placa y delta. Para esto se creó un código de ficha para cada dato siguiendo una secuencia según la fecha en que fue puesta la placa.

Ejemplo:

Figura 10.

Ejemplo de código de ficha para ingresar a la base datos geológica



- **Nivel:** para el proyecto se trabajaron los niveles 89 y 99.
- **Subnivel:** Cada subnivel son 2 m hacia arriba o 2 m hacia abajo desde un nivel principal. Para el nivel 89 solo se trabajó el subnivel 0 y para el nivel 99 se trabajó el subnivel 0 y subnivel +1.
- **Número de placa:** Es la abreviatura del nombre de la mina y un número de identificación. Ejemplo: PTO 35 (Puerto Arturo 35)
- **Dirección del frente:** orientación del frente de explotación.
- **Dirección vertical:** labores en clavada o en paquete.

- **Frente:** nombre de la mina y el nivel ejemplo: Puerto Arturo nivel 99.
- **Ubicación:** distancia en metros entre las placas y distancia de la placa hasta el frente de trabajo.
- **Coordenadas x, y, z:** posterior a la revisión y corrección de las coordenadas de cada descripción, se hizo la transcripción a la base de datos en Access.
- **Producción:** si el frente es productivo se especifica si al momento de la visita hubo tula o lona.
- **Descripción de las unidades:** es una breve descripción de lo que se observó en el frente, como litología, composición de la roca, color, contenido de materia orgánica, espesor de los estratos, grado de fracturamiento, presencia de estructuras como fallas, diaclasas, pliegues, contactos entre unidades y resistencia de la roca (en un rango de R0 hasta R6)
- **Descripción de vetas:** si en el frente se observan vetas, vetillas, stockwork, patinas, geodas, minerales diseminados, minerales en zonas puntuales, embrechados; se hace la descripción teniendo en cuenta su espesor, orientación (vertical, subvertical, inclinada, subhorizontal, horizontal, aleatoria o paralela), tipo de asociación mineralógica., ubicación (especificar si la estructura se encuentra en el frente, en el hastial derecho, hastial izquierdo y si se ubica en la parte superior, media o inferior)
- **Datos estructurales en cuadrantes y en Dip/ Dip Direction:** datos estructurales de estratificación, planos de falla, diaclasas y vetas.

Algunos de los datos que fueron revisados y verificados no presentaban orientación o el dato estaba incorrecto o incompleto por lo que esta información no se tuvo en cuenta al momento de hacer la transcripción a Access.

- **Registro fotográfico:** para cada descripción se enlazó un hipervínculo de la foto del frente y una foto de alguno de los hastiales que representa algo geológicamente importante como un contacto entre unidades, planos de falla o alguna veta o vetilla.
- **Tipo de filtración de agua:** frente seco, húmedo, con goteo puntual, goteos sistemáticos o flujo continuo.
- **Recomendaciones:** esta parte de la descripción es fundamental ya que desde el área de geología se hacen las debidas recomendaciones teniendo como base los datos geológicos anteriores para determinar hacia donde se pueden dirigir las labores de la mina para llegar a las zonas productivas.

Figura 11.

Formato Access para las descripciones geológicas.

The image shows a web-based form titled "Descripciones Geológicas" with the MTC logo. The form is organized into several sections:

- Navigation:** Two buttons at the top: "TABLA DESCRIPCIONES" and "NEW CONTROL TULAS AND LONAS".
- Form Fields:** A grid of input fields for data entry:
 - Left column: Fecha, Código ficha, Nivel (dropdown), Subnivel (dropdown), # Placa ó # Delta, Dirección del frx.
 - Middle column: Mina (dropdown), Realizado por (dropdown), Frente (dropdown), Ubicación (text area), Dirección en vertical (dropdown).
 - Right column: X, Y, Z (text fields), # Lonas, # Tulas (text fields), Muestras recolectadas (checkbox).
- Description Areas:** Two large text boxes at the bottom: "Descripción de unidades" and "Descripción de vetas".

Datos Estructurales (Cuadrantes)

Datos Estructurales DIP/DDIP

DIP (EST)	<input type="text"/>	DIP (FALLA)	<input type="text"/>	DIP (CNT)	<input type="text"/>	DIP (VETA)	<input type="text"/>
DDIP (EST)	<input type="text"/>	DDIP (FALLA)	<input type="text"/>	DDIP (CNT)	<input type="text"/>	DDIP (VETA)	<input type="text"/>
DIP (D1)	<input type="text"/>	DIP (D2)	<input type="text"/>	DIP (D3)	<input type="text"/>		
DDIP (D1)	<input type="text"/>	DDIP (D2)	<input type="text"/>	DDIP (D3)	<input type="text"/>		

Foto 1

Foto 2

Comentario Fotografía 1

Comentario Fotografía 2

DESCRIPCION DE VETAS



Tipo filtración de agua

Comentarios sobre filtraciones de agua

Comentario sobre muestras recolectadas

Recomendaciones

Detalle descripciones unidades

Fecha	Código ficha	Mina	Tipo de unidad	Composición

Fecha 2/02/2013

Código ficha CT-NV89-P4

Mina Catedral

Composición Calcáreo Resistencia

Subformulario: Detalle descripciones minerales

Código ficha	Tipo de unidad	Vetas/Vetillas/Estrechaduras	Orientación	Tipos asociación
CT-NV89-P4	Brecha falla	Vetillas	Altororia	Calcita
CT-NV89-P4	Brecha falla	Pedruscos Reflejos	Altororia	Calcita
CT-NV89-P4	Brecha falla	Vetillas	Inclinada	Plata
CT-NV89-P4	Brecha falla			
CT-NV89-P4	Brecha falla			



Tomado de Base de datos, Área de Geología Compañía Esmeraldas Mining Services S.A.S.

8.1.1.5 Etapa de actualización mapa geológico en el programa AutoCAD y modelo geológico general en el programa Micromine

Con la información geológica de la base de datos se hizo la actualización de los mapas geológicos en AutoCAD del nivel 89 de la mina Catedral y nivel 99 de la mina Puerto Arturo.

Se realizaron modificaciones de litología, estructuras como vetas y vetillas, datos estructurales, producciones, registro fotográfico y fechas.

Finalmente se realizó el modelamiento de las zonas de interés productivo en Micromine teniendo como base la información validada y verificada en las etapas anteriores.

8.1.2 Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de los datos geológicos revisados e interpretados del nivel 89 y nivel 99 de las minas Catedral y Puerto Arturo, a partir de una tabla en Excel donde se organizaron todos los datos, al igual que el modelo geológico general de la zona productiva que se pudo definir gracias a las debidas correcciones de las descripciones de los levantamientos geológicos.

8.1.2.1 Nivel 99

- **Datos totales verificados y validados**

Se hizo la revisión de 49 descripciones geológicas almacenadas en formato Excel y de acuerdo a la calidad de la información se migró a una nueva base de datos creada en Access y se hizo la respectiva depuración de los datos no confiables.

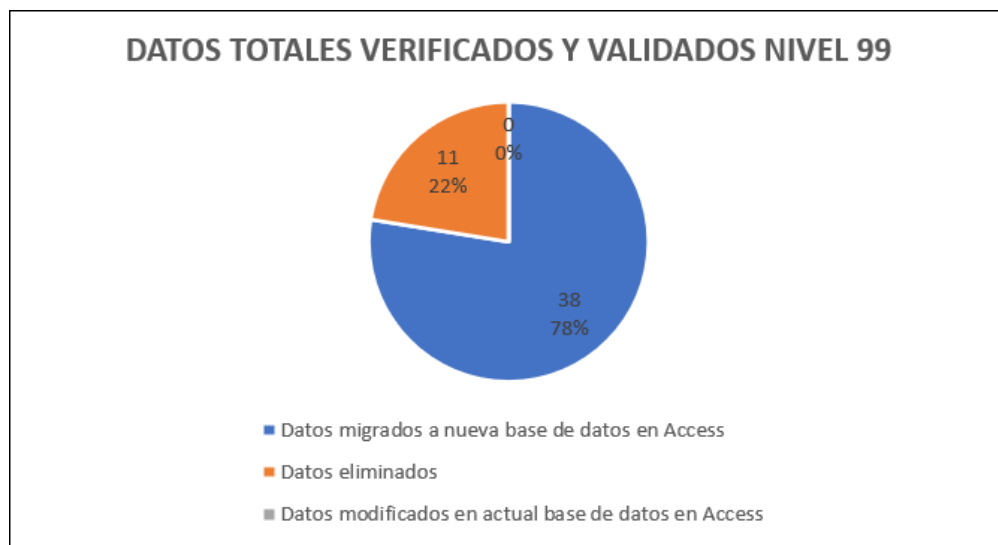
Tabla 4.

Datos totales verificados y validados del nivel 99 de la mina Puerto Arturo

DATOS VERIFICADOS Y VALIDADOS NIVEL 99	CANTIDAD DE DATOS TOTALES	CANTIDAD DATOS %
Datos migrados a nueva base de datos en Access	38	77,6
Datos eliminados	11	22,4
Datos modificados en actual base de datos en Access	0	0,0
Total datos verificados y validados	49	100,0

Figura 12.

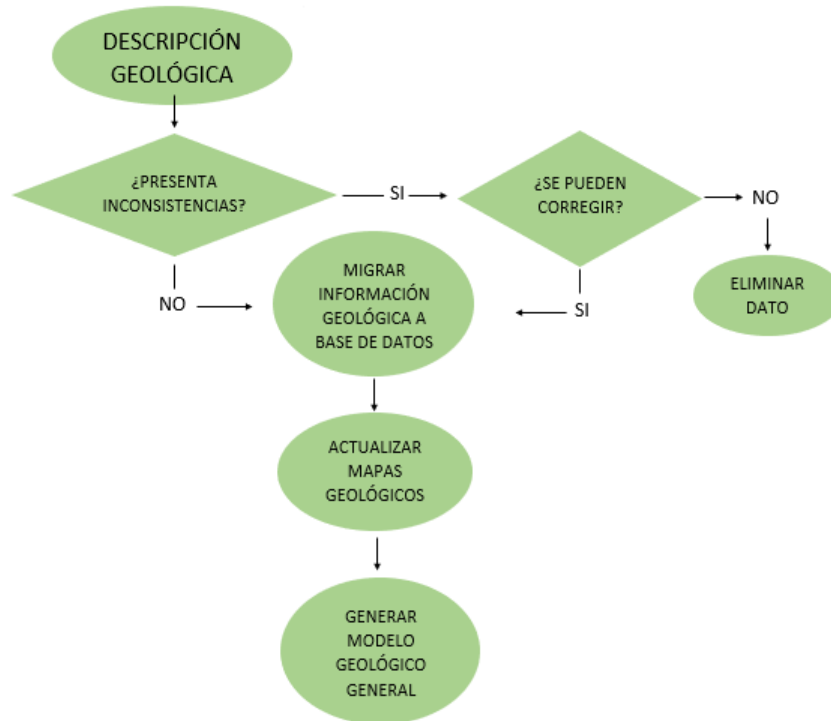
Diagrama circular de los datos totales verificados y validados del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.



- **Datos eliminados**

Figura 13.

Análisis para eliminar los datos geológicos representado en diagrama flujo.



Para el nivel 99 se eliminaron un total de 11 datos geológicos, 8 de ellos porque al hacer el análisis comparativo de la dirección del frente descrito en la descripción del formato Excel no coincidía con la dirección que llevaba las labores, por lo que se tomó como un dato no confiable, al igual que para el caso de 1 placa que, aunque está digitalizada en el mapa geológico no presenta descripción del frente, por lo que también se eliminó. Además, se eliminaron 2 datos por inconsistencias en la descripción geológica.

Al momento de hacer el análisis de los datos se evaluaron una serie de razones por las cuales algunos datos no son confiables y generan resultados no deseados.

- **Identificación del error en el levantamiento geológico**

con este proceso se pretende determinar o detectar la causa del porqué del error, el cual puede ser por fallas humanas o por los instrumentos de trabajo.

Para el caso de la diferencia en la dirección del frente se pudo deber a una mala calibración de la brújula, error en el levantamiento topográfico, magnetización de la brújula por la presencia de elementos como el hierro que se usa en las labores mineras que hace que la aguja de la brújula apunte a una dirección errónea, la persona que toma el dato no tiene buen manejo de la brújula o no presenta una ubicación espacial adecuada.

El otro criterio que se tuvo en cuenta para la eliminación de los datos fue la falta de descripción geológica, donde la placa esta digitalizada en el plano, pero no está descrita en el formato Excel, esto pudo ocurrir por una falta de coordinación del procedimiento a seguir cuando se hace el levantamiento geológico.

- **Como corregir el error**

Para garantizar un buen dato de la dirección del frente se debe asegurar que la herramienta de trabajo, para este caso la brújula este calibrada, al igual cuando se esté tomando el dato en mina tener presente los elementos que generen una desviación en la aguja, asegurar que la persona que toma el dato lo haga de manera correcta y verificar que el levantamiento topográfico coincida con la dirección que se tomó.

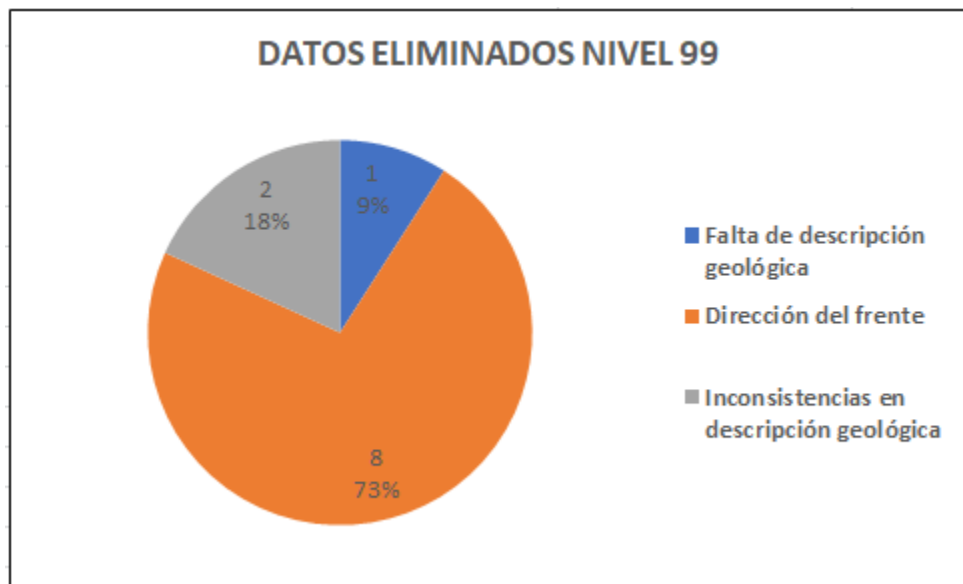
Tabla 5.

Datos eliminados del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.

CRITERIOS PARA LA ELIMINACIÓN DE DATOS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Falta de descripción geológica	1	9,1
Dirección del frente	8	72,7
Inconsistencias en descripción geológica	2	18,2
Total datos eliminados	11	100,0

Figura 14.

Diagrama circular del total de datos geológicos eliminados validados del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.



- **Verificación de coordenadas**

Como se observa en la tabla 6 del total de los datos revisados que fueron 49, todos presentaban coordenadas en la descripción del formato Excel y de los 38 datos que fueron migrados a la base de datos Access a todos se les realizó modificación de coordenadas.

Tabla 6.*Verificación de coordenadas nivel 99, mina Puerto Arturo*

COORDENADAS DATOS TOTALES VERIFICADOS Y VALIDADOS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con coordenadas	49	100,0
Datos sin coordenadas	0	
MODIFICACIONES DE COORDENADAS DATOS MIGRADOS A BASE DATOS ACCESS		
Datos con modificación de coordenadas	38	100,0
Datos sin modificación de coordenadas	0	

- **Datos verificados y validados desde el año 2012 hasta el año 2015**

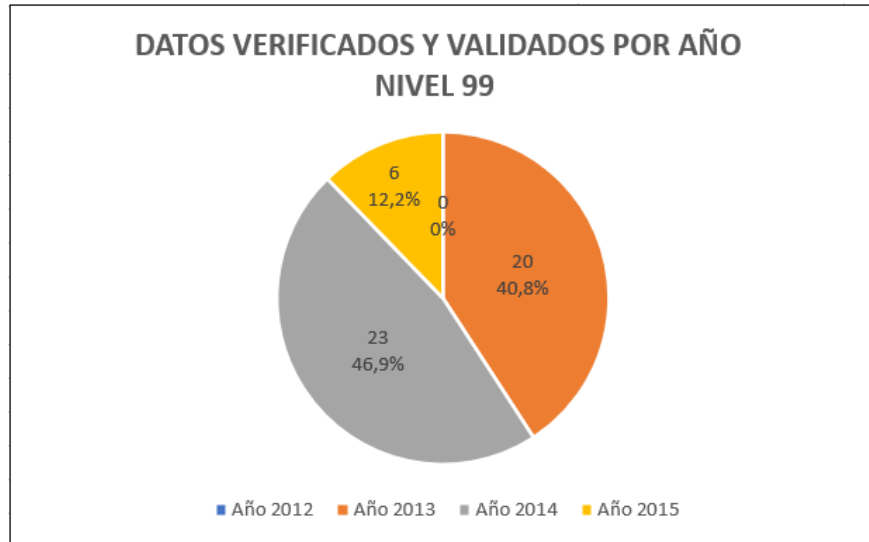
Los levantamientos geológicos que se tienen del nivel 99 de la mina Puerto Arturo fueron realizados a partir del año 2013 y actualmente se continúan haciendo descripción de los frentes y durante estos años se ha venido aportando conocimiento geológico para identificar y explotar las zonas productivas.

Tabla 7.*Datos verificados y validados por año del nivel 99 mina Puerto Arturo*

DATOS VERIFICADOS Y VALIDADOS POR AÑO NIVEL 99	CANTIDAD DE DATOS POR AÑO	CANTIDAD DATOS %
Año 2012	0	0
Año 2013	20	40,8
Año 2014	23	46,9
Año 2015	6	12,2
Total	49	100,0

Figura 15.

Diagrama circular de los datos geológicos verificados y validados por año del nivel 99 mina Puerto Arturo.



- **Datos eliminados y migrados a base de datos Access por año**

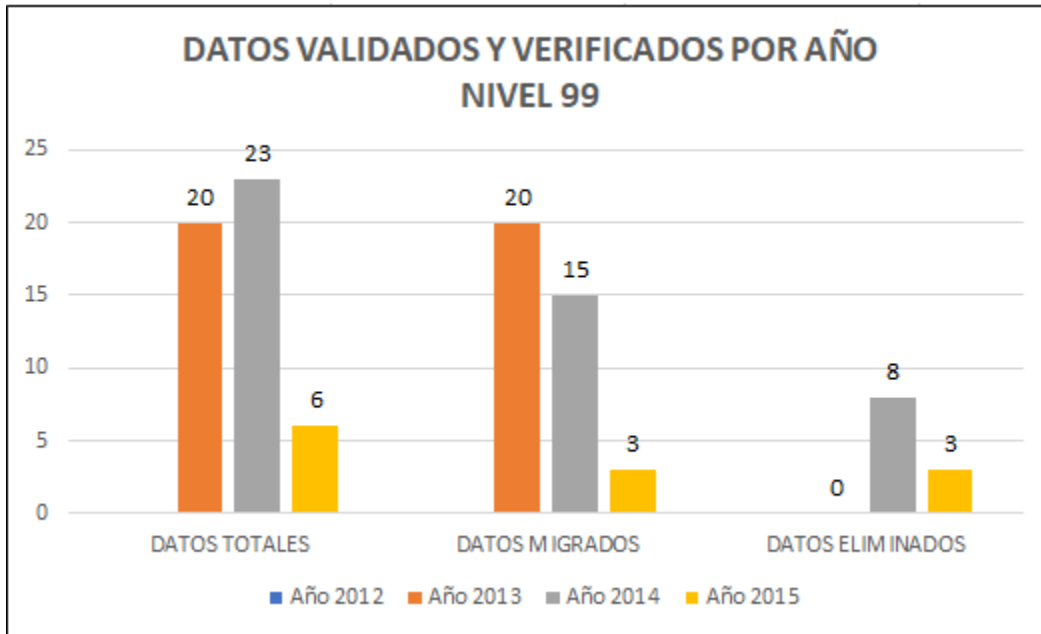
Tabla 8.

Datos totales, migrados y eliminados del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.

DATOS VALIDADOS Y VERIFICADOS POR AÑO NIVEL 99	DATOS TOTALES	DATOS MIGRADOS	DATOS ELIMINADOS
Año 2012	0	0	0
Año 2013	20	20	0
Año 2014	23	15	8
Año 2015	6	3	3
Total	49	38	11

Figura 16.

Diagrama de barras de los datos geológicos totales, migrados y eliminados del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.



Como se observa en la tabla 8 para el año 2013 los datos que se revisaron presentan un 100% de confiabilidad por lo que todos fueron llevados a la nueva base de datos en Access.

De los 23 datos verificados y validados para el año 2014, el 65,2 % que equivale a 15 datos, fueron migrados y el 34,8 % de los datos fueron eliminados, este porcentaje indica que para este año la calidad de la información geológica que se tomó no es muy confiable.

Para el año 2015, se tiene que de 6 datos revisados 3 (50%) fueron llevados a la base de datos y el otro 50% no se tuvo en cuenta por la calidad de la información.

- **Revisión de registro fotográfico**

El registro fotográfico fue de gran utilidad al momento de hacer el análisis comparativo de las descripciones almacenadas en formato Excel, con lo digitalizado en el mapa geológico.

De los datos que se revisaron el 93,9 % cuenta con fotografía y 3 de ellos que representan el 6,1% no, sin embargo, este no fue un criterio para descartar estos datos ya que la descripción geológica era detallada y la litología descrita en el formato coincidía con lo digitalizado en el plano.

Tabla 9.

Registro fotográfico de los datos del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.

REGISTRO FOTOGRÁFICO DATOS TOTALES VERIFICADOS Y VALIDADOS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con fotografía	46	93,9
Datos sin fotografía	3	6,1
Datos totales	49	100,0

REGISTRO FOTOGRÁFICO DATOS MIGRADOS A BASE DATOS ACCESS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con fotografía	36	94,7
Datos sin fotografía	2	5,3
Datos totales migrados a Access	38	100,0

- **Modificaciones en el plano de los datos migrados a Access**

Tabla 10.

Datos con modificaciones en el mapa geológico del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.

MODIFICACIONES EN EL PLANO DE LOS DATOS MIGRADOS A BASE DE DATOS ACCESS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con modificaciones	38	100,0
Datos sin modificaciones	0	

De los 38 datos que fueron transcritos al 100% se les realizo modificaciones como:

- Fecha del día en que se realizó el levantamiento geológico del frente, a todas las placas y deltas.
- A todas las placas y deltas se les enlazo un hipervínculo de la foto del frente y hastiales.
- A todas las placas y deltas se le hizo ajustes de coordenadas.
- Ajustes de litología.
- Digitalización de vetas y vetillas.
- Digitalización de datos estructurales de estratificación y orientación de vetas.
- Producción.

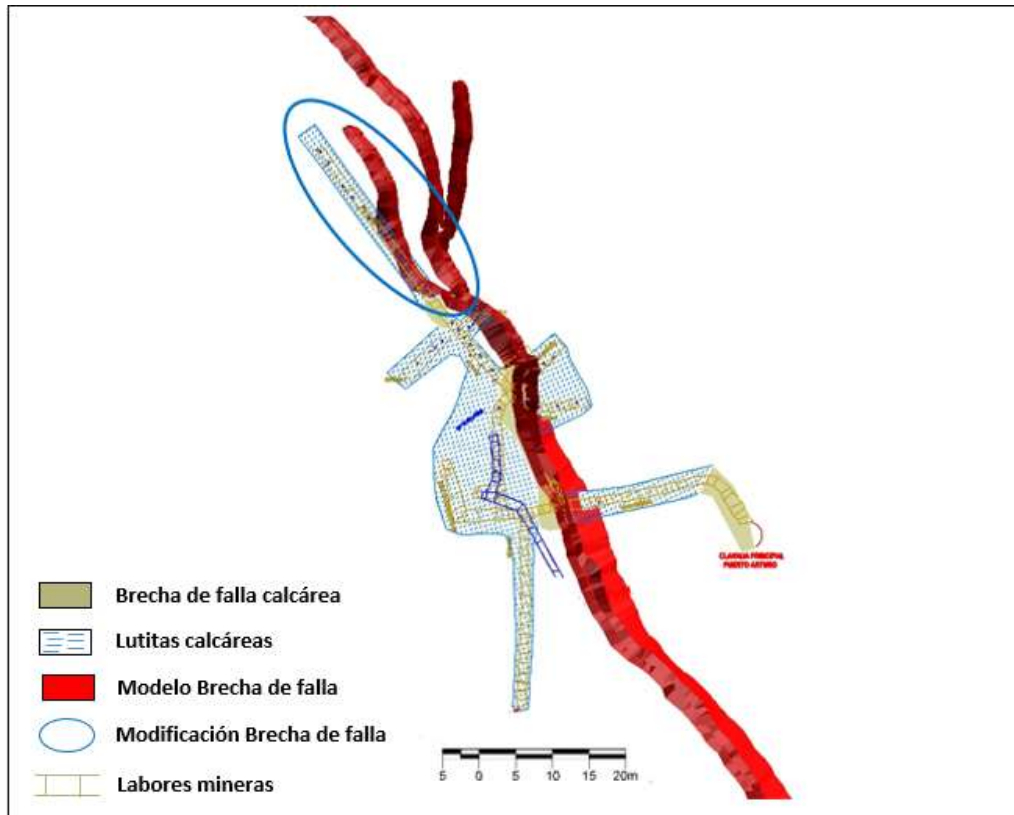
- **Modelo geológico de la zona de interés productivo**

A partir de los datos geológicos validados, verificados y depurados se realizó una actualización del modelo geológico del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.

En la parte superior de la figura 17 señalado en azul se propone una zona de brecha de falla, la cual sale a partir de una estructura principal.

Figura 17.

Actualización modelo geológico de la zona de interés productivo, del nivel 99 de la mina Puerto Arturo.



8.1.2.2 Nivel 89

- **Datos totales verificados y validados**

Se revisaron 211 descripciones geológicas del nivel 89 de la mina Catedral, de los cuales 191 fueron migrados a la nueva base de datos en Access, 16 eran datos no confiables por lo que fueron depurados y 4 datos fueron modificados en la actual base de datos en Access. (Figura 11)

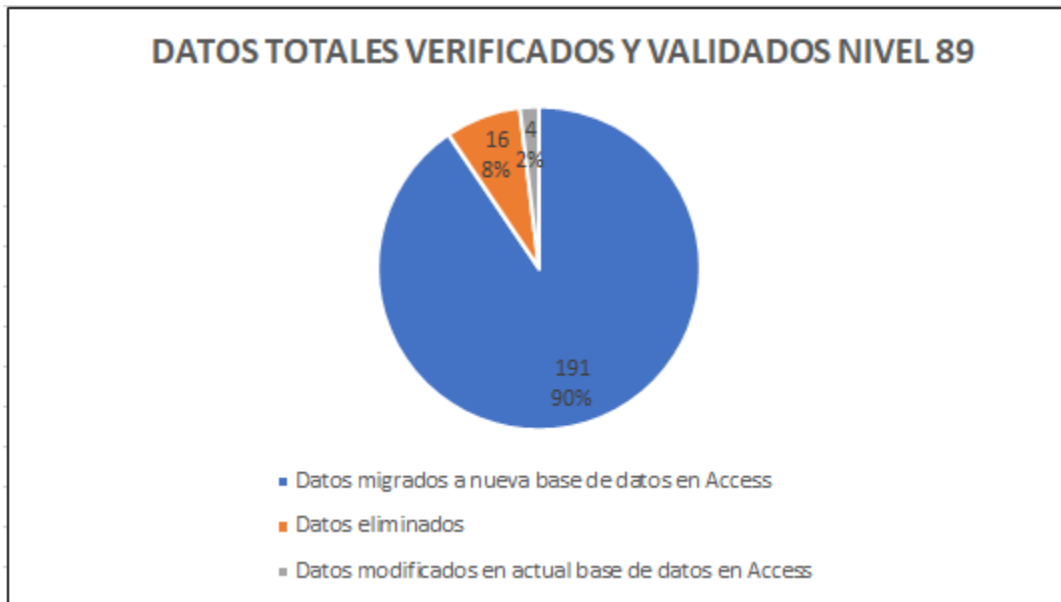
Tabla 11.

Datos verificados y validados totales del nivel 89, mina Catedral.

DATOS VERIFICADOS Y VALIDADOS NIVEL 89	CANTIDAD DE DATOS TOTALES	CANTIDAD DATOS %
Datos migrados a nueva base de datos en Access	191	90,5
Datos eliminados	16	7,6
Datos modificados en actual base de datos en Access	4	1,9
Total datos verificados y validados	211	100,0

Figura 18.

Diagrama circular de los datos totales, verificados y validados del nivel 89, mina Catedral.



- **Datos eliminados**

Del total de las descripciones geológicas revisadas y analizadas de los años 2012 a 2015 se eliminaron 16 datos teniendo presente criterios como ausencia de coordenadas, falta de registro fotográfico, falta de dirección del frente y escasa información en la descripción geológica (descripción litológica incompleta, falta de datos estructurales, falta de descripción de

estructuras como vetas, vetillas, patinas, stockwork, embrechados, presencia de minerales diseminados o en zonas puntuales.)

Tabla 12.

Datos eliminados del nivel 89 de la mina Catedral.

CRITERIOS PARA LA ELIMINACIÓN DE DATOS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Falta de descripción geológica	3	18,8
Descripción geológica incompleta	13	81,3
Total datos eliminados	16	100,0

Figura 19.

Diagrama circular de los datos eliminados del nivel 89 de la mina Catedral.



Con el análisis de los datos se evaluaron una serie de razones por las cuales algunos datos no son confiables y generan resultados no deseados.

- **Identificación del error en el levantamiento geológico**

De los 16 datos que fueron eliminados debido a la calidad de la información, 3 (18,8%) es por ausencia de descripción geológica, debido a un error de procedimiento ya que las placas están digitalizadas en el plano, pero no presentan descripción, por lo que no se llevó a cabo el procedimiento para el levantamiento geológico. 13 datos (81,3%) se eliminaron por falta de información geológica como: coordenadas, dirección del frente, datos estructurales, producción, registro fotográfico y descripción litológica incompleta.

- **Como corregir el error**

Al momento de realizar el levantamiento geológico de los frentes, se debe asegurar que la información almacenada en la base de datos y en los mapas geológicos sea confiable, y para esto se debe realizar un procedimiento de control de calidad y verificación de los datos para garantizar que el levantamiento geológico se está llevando a cabo de manera correcta.

- **Verificación de coordenadas**

Tabla 13.

Verificación de coordenadas nivel 89, mina Catedral.

COORDENADAS DATOS TOTALES VERIFICADOS Y VALIDADOS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con coordenadas	190	90,0
Datos sin coordenadas	21	10,0
Datos totales	211	100,0
DATOS SIN COORDENADAS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos sin coordenadas eliminados	13	61,9
Datos sin coordenadas no eliminados	8	38,1
Datos totales sin coordenadas	21	100,0
MODIFICACIONES DE COORDENADAS DATOS MIGRADOS Y ACTUALIZADOS EN BASE DATOS ACCESS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con modificación de coordenadas	189	96,9
Datos sin modificación de coordenadas	6	3,1
Datos totales migrados y actualizados	195	100,0
DATOS CON MODIFICACIÓN DE COORDENADAS POR AÑO	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Año 2013	55	29,1
Año 2014	99	52,4
Año 2015	35	18,5
Datos totales con modificación coordenadas	189	100,0

De los 21 datos que no presentan coordenadas 13 (61,9%) fueron eliminados y 8 (38,1 %) no fueron eliminados porque a pesar de que la georreferenciación es fundamental para saber la ubicación exacta del frente, estas placas presentan información geológica complementaria como descripción litológica, datos estructurales, registro fotográfico, dirección del frente que fueron de utilidad para migrar o actualizar la información a la base de datos en Access.

El procedimiento que se realizó para determinar si los datos necesitaban o no modificación de coordenadas, fue digitalizar cada punto de los datos que tenían coordenadas en la descripción del formato Excel o del formato Access y compararlo con el punto que estaba digitalizado en el plano.

Todos los datos geológicos del año 2012 fueron eliminados por lo que no se tuvieron presentes en la tabla de los datos con modificaciones de coordenadas.

De los 189 datos totales que presentaron modificaciones por coordenadas, para el 2013 el 29,1% es decir 55 datos presentaron variación en las coordenadas, en 2014, 99 datos (52,4%) y para el 2015 a 35 (18,5%). (Figura 13)

- **Datos verificados y validados desde el año 2012 hasta el año 2015**

La información geológica revisada del nivel 89 de la mina Catedral está a partir del año 2012 hasta el año 2015, pero actualmente se continúan con labores mineras sobre este nivel, al igual que con los levantamientos geológicos.

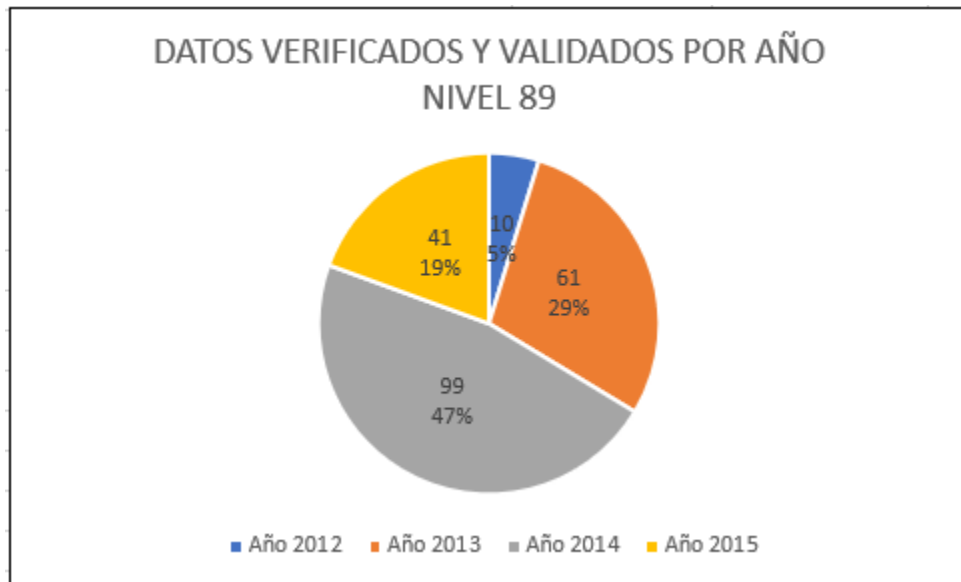
Tabla 14.

Datos verificados y validados por año del nivel 89 mina Catedral.

DATOS VALIDADOS Y VERIFICADOS POR AÑO NIVEL 89	CANTIDAD DE DATOS POR AÑO	CANTIDAD DE DATOS %
Año 2012	10	4,7
Año 2013	61	28,9
Año 2014	99	46,9
Año 2015	41	19,4
Total	211	100,0

Figura 20.

Diagrama circular de los datos geológicos verificados y validados por año del nivel 89 mina Catedral.



- **Datos eliminados, migrados y actualizados en la actual base de datos Access por año**

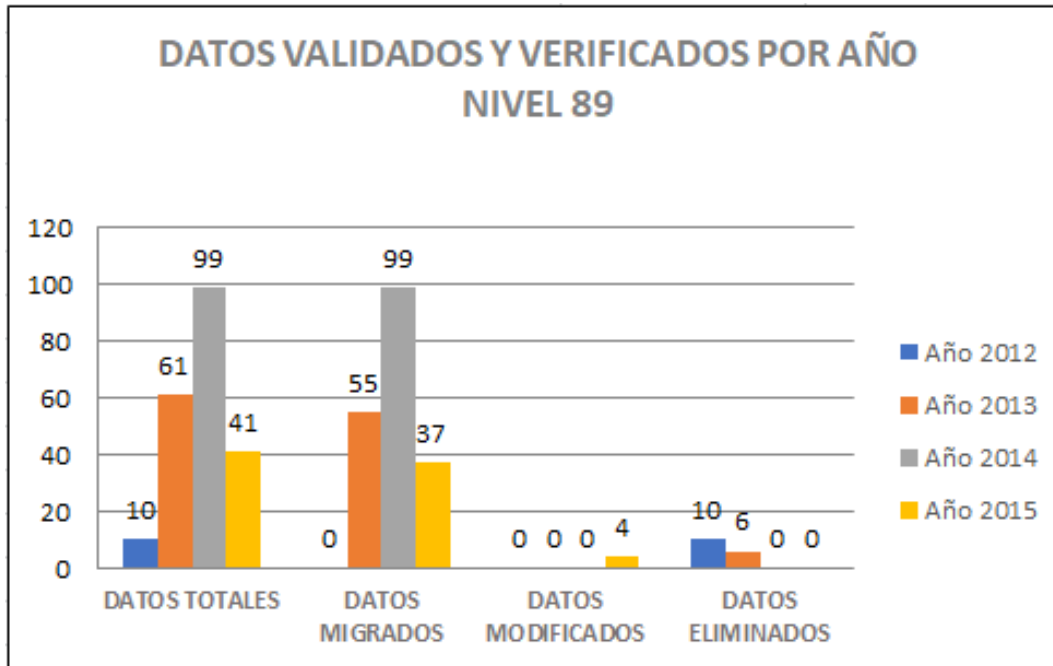
Tabla 15.

Datos totales, migrados, eliminados y modificados en actual base de datos del nivel 89 de la mina Catedral.

DATOS VALIDADOS Y VERIFICADOS POR AÑO NIVEL 89	DATOS TOTALES	DATOS MIGRADOS	DATOS MODIFICADOS	DATOS ELIMINADOS
Año 2012	10	0	0	10
Año 2013	61	55	0	6
Año 2014	99	99	0	0
Año 2015	41	37	4	0
Total	211	191	4	16

Figura 21

Diagrama de barras de los datos geológicos totales, migrados, modificados en actual base de datos y eliminados del nivel 89 de la mina Catedral.



Según la tabla 15 para el año 2012 de todos los datos revisados el 100% fue eliminado ya que la calidad de la información geológica era muy baja, los datos no presentan coordenadas, dirección de frente, datos estructurales, registro fotográfico y presentan descripción litológica incompleta.

De los 61 datos revisados del 2013, 55 (90,2%) fueron migrados a la nueva base de datos, 6 (9,8%) eliminados y ningún dato fue modificado en la base de datos actual.

Para el año 2014 el 100% de los datos fue migrado a formato Access. La calidad de la información que se verifico y valido de este año es confiable.

Para el año 2015 fueron revisados 41 datos, 37 (90,2%) fue migrado a la base de datos en Access, 4 (9,8%) se modificó en la actual base de datos y ningún dato fue eliminado.

Las modificaciones que se realizaron en la actual base de datos fueron de georreferenciación.

Analizando los datos geológicos obtenidos del nivel 89, se puede afirmar que la calidad de la información fue mejorando, obteniendo resultados más confiables. Este aumento en la calidad se pudo deber a un mejor procedimiento al momento de realizar el levantamiento geológico y almacenamiento de la información geológica.

- **Revisión de registro fotográfico**

Como se observa en la tabla 16 de los 211 datos totales verificados y validados, 179 (84,8%) cuentan con registro fotográfico y 32 (15,2%) no. De los 191 datos migrados a la base de datos en Access 15 (7,9%) no cuentan con foto y de los 4 que se les realizó correcciones en Access 1 (25%) no presenta fotografía. A pesar de que la fotografía fue un elemento útil al momento de revisar la información geológica, estos datos presentaban una descripción completa, por lo que fueron usados.

Tabla 16.

Registro fotográfico de los datos del nivel 89 de la mina Catedral

REGISTRO FOTOGRÁFICO DATOS TOTALES VERIFICADOS Y VALIDADOS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con fotografía	179	84,8
Datos sin fotografía	32	15,2
Datos totales	211	100,0
REGISTRO FOTOGRÁFICO DATOS MIGRADOS A BASE DATOS ACCESS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con fotografía	176	92,1
Datos sin fotografía	15	7,9
Datos totales migrados a Access	191	100,0
REGISTRO FOTOGRÁFICO DATOS MODIFICADO A BASE DATOS ACCESS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con fotografía	3	75,0
Datos sin fotografía	1	25,0
Datos totales modificados en Access	4	100,0

- **Modificaciones en el plano de los datos migrados y modificados en Access**

Tabla 17.

Datos con modificaciones en el mapa geológico del nivel 89 de la mina Catedral.

MODIFICACIONES EN EL PLANO DE LOS DATOS MIGRADOS Y MODIFICADOS EN BASE DE DATOS ACCESS	CANTIDAD DE DATOS	CANTIDAD DATOS %
Datos con modificaciones	195	100,0
Datos sin modificaciones	0	0,0
Total datos modificados	195	100,0

De los 195 datos que fueron transcritos al 100% se les realizo modificaciones como:

- Fecha a todas las placas y deltas del día en que se realizó el levantamiento geológico del frente.
- A todas las placas y deltas se les enlazo un hipervínculo de la foto del frente y hastiales.

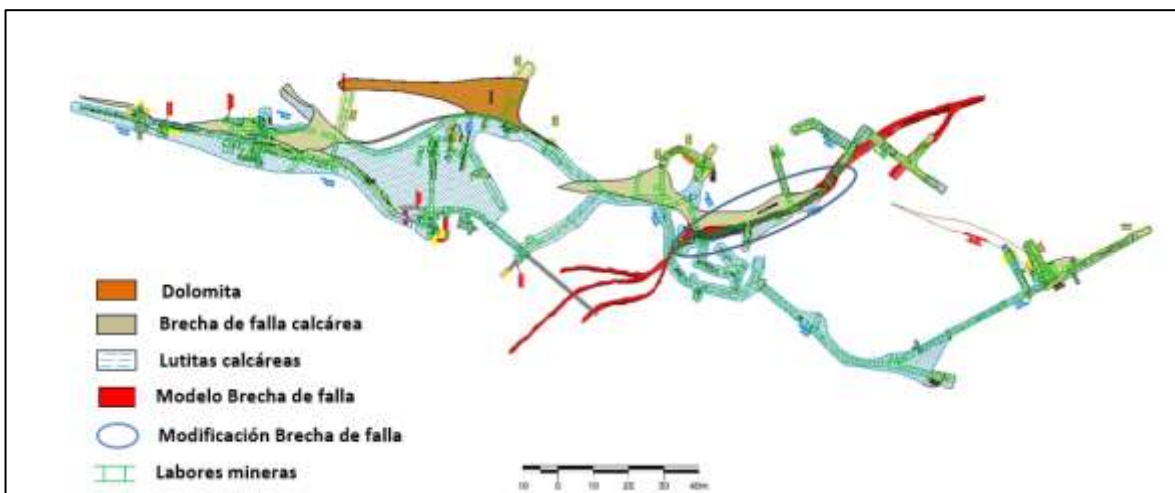
- Ajuste de coordenadas.
- Ajuste de litología.
- Digitalización de vetas y vetillas.
- Digitalización de datos estructurales de estratificación y orientación de vetas.
- Producción.

- **Modelo geológico de la zona de interés productivo**

En el nivel 89 de la mina catedral se presentan varias zonas de brecha que representan interés productivo y a partir de los datos geológicos validados, verificados y depurados se realizó una actualización del modelo geológico, donde se propone la continuidad de una zona de brecha de falla, (resaltado en azul), la cual hace parte de una estructura principal.

Figura 22.

Actualización modelo geológico de la zona de interés productivo, del nivel 89 de la mina Catedral.



9. CONCLUSIONES

- Por medio de los procedimientos de control y aseguramiento de la calidad de los datos geológicos, se obtuvieron resultados confiables que permitieron un mayor conocimiento del yacimiento y de las estructuras que representan interés productivo en las minas Catedral y Puerto Arturo.
- A partir de la validación, verificación y depuración de los datos geológicos de los años 2012 a 2015 de los niveles 89 y 99 de las minas Catedral y Puerto Arturo se definieron dos zonas de brecha de falla, con algunas estructuras como vetas y vetillas potenciales y productivas.
- Con la validación y verificación de los datos geológicos se logró determinar algunos errores en el procedimiento del levantamiento geológico y en la transcripción de la información a la base de datos.
- Mediante la depuración de la información se realizó una actualización de las descripciones geológicas almacenadas y se aceptaron o rechazaron los datos de acuerdo a su calidad y confiabilidad.
- Se realizó la migración de 229 datos geológicos de los niveles 89 y 99 de las minas Catedral y Puerto Arturo a una nueva base de datos en formato Access, con información coherente, confiable y de fácil acceso.
- Se actualizaron los mapas geológicos donde se definieron unidades que fueron afectadas por fallas y pliegues como zonas brechas que son de interés productivo y unidades de roca con mayor competencia, donde es recomendable realizar las labores mineras por temas de sostenimiento.

10. RECOMENDACIONES

- Del total de 260 datos geológicos validados y verificados el 10.4% fue eliminado; este porcentaje indica que muchos de los datos presentan errores e inconsistencias por lo que se recomienda realizar un procedimiento de aseguramiento y control de calidad de la información almacenada de los años 2012 a 2015 para todas las minas del título minero 121_95M, realizando la validación, verificación y depuración de los datos geológicos ya que estos pueden dar información importante para entender mejor el comportamiento del yacimiento y delimitar zonas de interés productivo.
- Se recomienda migrar toda la información geológica de los años 2012 a 2015 previamente validada, verificada y depurada a una única base de datos en formato Access con el objetivo de tener mayor facilidad al momento de acceder a la información y contar con datos confiables y de calidad.
- Se recomienda actualizar los mapas geológicos con registro fotográfico, fecha a los deltas, unidades litológicas, datos estructurales de fallas, pliegues, vetas y estratificación de la roca.
- Con los datos geológicos migrados a la nueva base de datos y los mapas actualizados, se recomienda realizar un modelamiento geológico de las unidades y estructuras para tener una representación del yacimiento en cuanto a su tamaño, forma y zonas que representen interés productivo.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L., & Mora, H. (2007). Strike-slip deformation within the Colombian Andes. *Geological Society, London, Special Publications*, 272(1), 303-319.
- Alperin, M. (2013). Introducción al análisis estadístico de datos geológicos. *Series: Libros de Cátedra*.
- Asato, CG, Pérez Cerdán, F., & Marín, G. (1996). SIG Central del Servicio Geológico, La Importancia del Manejo Integrado de Datos Geológicos en Formato Digital.
- Asociados, M. P. G. (1991). Exploración zona de reserva nacional para esmeraldas Muzo–Coscuez, Boyacá, Área Suroriental.
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Cobbold, P., Baby, P., Laumonier, B. & Giuliani, G., 1999a. Andean transpressive tectonics at the eastern edge of the Cordillera Oriental, Colombia (Chivor-Guavio area). Fourth ISAG, Goettingen (Germany), 04 - 06/10/1999.
- Bürgl, H. (1955), Condiciones geológicas de las minas de esmeraldas de Muzo, Boyacá.
- Carrillo-Lombana, V. M. (2009). Esmeraldas de Colombia patrimonio geológico de la humanidad. Bogotá: Sociedad Colombiana de Geología. Sociedad Colombiana de Geología. 76 pág. ISBN:9789584401335.
- Ccama Hanco, M. L. (2017). Aplicación del QAQC en el proceso geológico, para validar la estimación de recursos y reservas, de la unidad operativa Chungar.

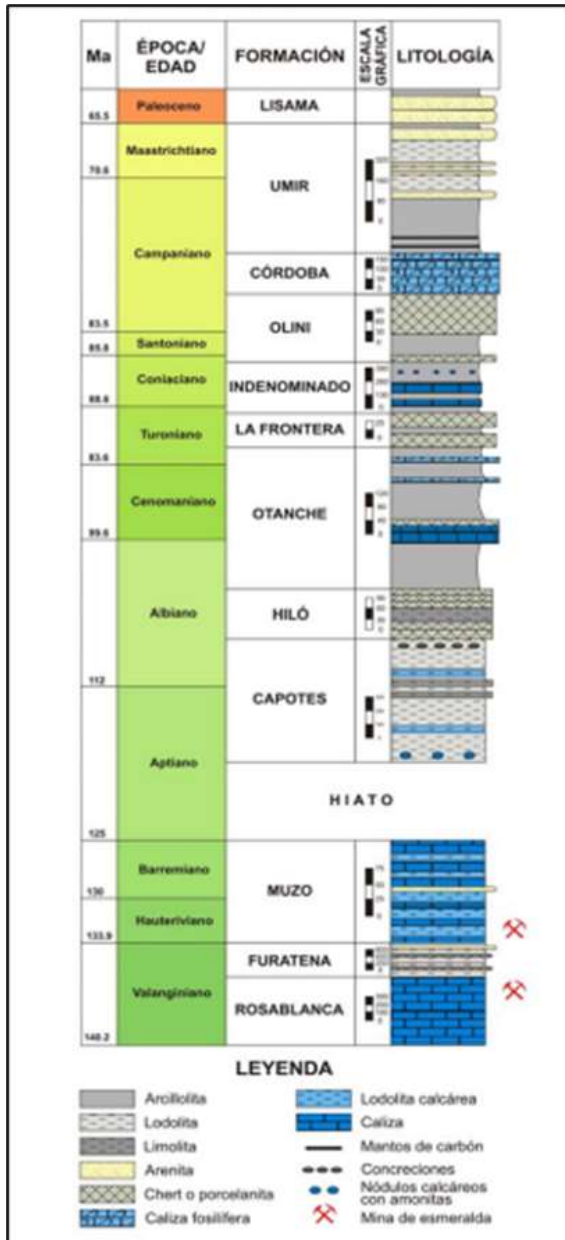
- Cheilletz, A., Féraud, G., Giuliani, G., & Rodríguez, C. T. (1994). Time-pressure and temperature constraints on the formation of Colombian emeralds; an $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser microprobe and fluid inclusion study. *Economic Geology*, 89(2), 361-380.
- Cooper, MA, Addison, FT, Álvarez, R., Coral, M., Graham, RH, Hayward, AB, ... & Taborda, A. (1995). Desarrollo de cuencas e historia tectónica de la Cuenca de los Llanos, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena, Colombia. *Boletín AAPG*, 79 (10), 1421-1442.
- Díaz Poveda, L. (2016). Evolución sedimentaria y estructural del Eoceno superior, Cordillera oriental de Colombia, Sur América.
- Etayo, F., Cediel, F., & Cáceres, C. (1997). Mapa de distribución de facies y ámbito tectónico a través del Fanerozoico de Colombia. *Escala*, 1(1), 500-000.
- Fuquen, J. & Osorno, J. (2005). Mapa geológico de la Plancha 190 Chiquinquirá. Escala 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS.
- Giuliani, G., Cheilletz, A., Dubessy, J. & Rodriguez, C., (1990 a). Chemical composition of fluid inclusion in Colombia emerald deposits. Proceedings of the Eight Quadriennial IAGOD Symposium, Ottawa, Canada. 159-168.
- Giuliani, G., Cheilletz, A., Arboleda, C., Carrillo, V., Rueda, F. & Baker, J. H., (1995 a). An Evaporitic Origin of the Parent brines of Colombian Emeralds: Fluid inclusion and sulphur isotope evidence. *European Journal of Mineralogy* 7:151-165. Stuttgart.
- Giuliani, G., Cheilletz, A., France-Lanord, C., & Rueda, F. (1996). The role of organic matter in high temperature hydrothermal regimes. In *“Third International Symposium on Andean Geodynamics Proceedings”* (pp. 683-686). ORSTOM editions.

- Giuliani, G., Bourles, D., Massot, J., & Siame, L. (1999). Colombian emerald reserves inferred from leached beryllium of their host black shale. *Exploration and Mining Geology*, 8(1-2), 109-116.
- Giuliani, G., Branquet, Y., Fallick, AE., Groat LA., Marshall D. (2015). Emerald deposits around the world, their similarities and differences.
- González-Durán, A. F., García-Toloza, J., Bonilla, G., Cedeño-Ochoa, C. J., Angarita-Sarmiento, L. G., Castañeda-Gómez, A. J., & López-Castillo, C. L. (2021). Geoquímica y mineralogía de la mina La Pava, Muzo-Quípama: implicaciones en la exploración de esmeraldas en Colombia.
- Guerrero J., Carrillo G. (1997). Actualización cartográfica de unidades litoestratigráficas encajantes de mineralizaciones esmeraldíferas en el cinturón occidental de la Cordillera Oriental. Colombia.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2011). las esmeraldas de Colombia en su ámbito geológico excursión geológica a los cinturones esmeraldíferos de la cordillera oriental de Colombia en el marco del xiv congreso latinoamericano de geología del 29 de agosto al 2 de septiembre de 2011.
- Jiménez Guevara, J. F. (2017). Estudio químico, mineralógico y espectroscópico de esmeraldas colombianas de los distritos mineros de Chivor, Muzo y Coscuez y su aplicación en la determinación de origen geográfico. *Geología*.
- Lopes, B. (1995). Estudio estructural de las minas de esmeralda de Muzo. MINERALCO. 31.

- Maya, M., Buenaventura, J., & Salinas, R. (2004). Estado del conocimiento de la explotación de esmeraldas en Colombia. *Ministerio de Minas y Energía. Instituto Colombiano de Geología y Minería.*
- Ottaway, T. L. (1991). *The geochemistry of the Muzo emerald deposit, Colombia.* Toronto: University of Toronto.
- Pla, Rita. 2005. Validación de datos. Madrid: s.n., 2005
- Reyes, G., Montoya, D., Terraza, R., Fuquen, J., Mayorga, M., Gaona, T., & Etayo–Serna, F. (2006). Geología del cinturón esmeraldífero occidental Planchas 169, 170, 189 y 190. *INGEOMINAS. Comprende mapa a escala, 1, 100000.*
- Rico, J. J. H., & Alonso, J. A. V. (2009). La calidad de los datos. *Libre Empresa, 6(1), 43-50.*
- Schwarz, D., Giuliani, G., Grundmann, G. y Glas, M. (2002). El origen de la esmeralda. *Esmeraldas del Mundo, extraLapis English, 2, 18-23.*
- Terraza M., R. (2019). Notas sobre el contexto tectonoestratigráfico de formación de las esmeraldas colombianas. *Boletín Geológico, 45, 37-48.*
- Ulloa, M., & MCE, U. (1980). Ambiente geológico de los yacimientos esmeraldíferos en Colombia.
- Ulloa, C. & Rodríguez, E. 1991. Memoria explicativa Plancha 190. Chiquinquirá (Departamento de Boyacá). INGEOMINAS. Bogotá. Colombia. 5-22 p., Bogotá.
- Valdivia Flores, F. J. (2017). Estudio geológico y control de calidad (QA/QC) en la Unidad Minera Arcata.

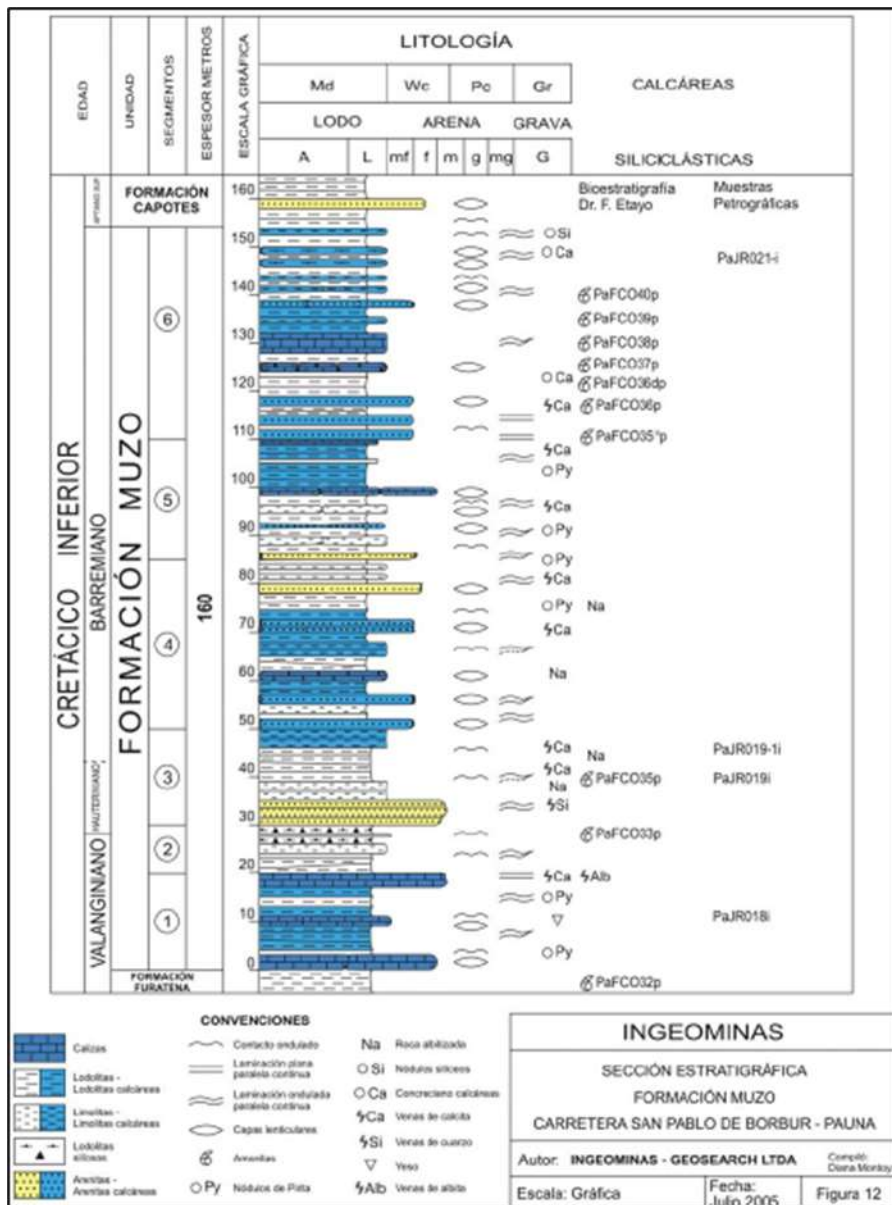
12. ANEXOS

Anexo 1 Columna estratigráfica generalizada de la zona central del Cinturón Esmeraldífero Occidental.



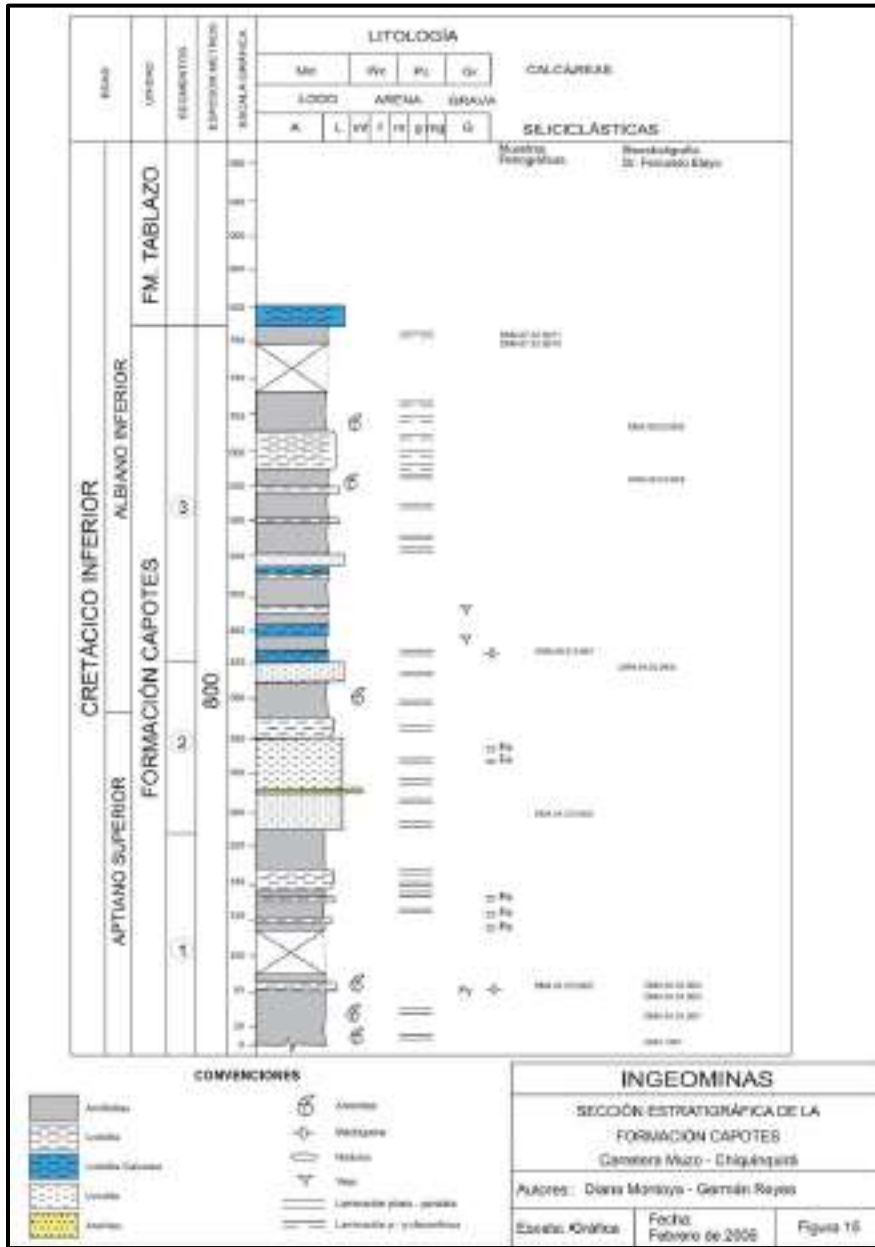
Tomado de Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. (2011). Actual Servicio Geológico Colombiano.

Anexo 2. Columna estratigráfica Formación Muzo vía San Pablo de Borbur-Pauna.



Tomado de Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. (2005). Actual Servicio Geológico Colombiano.

Anexo 3. Columna estratigráfica Formación Capotes vía Muzo-Chiquinquirá.



Tomado de Reyes et al (2006).