

Caracterización Mineralógica, Petrográfica Y Estructural De Las Venas Hidrotermales Del
Contrato De Concesión GD1-081 Ubicado En La Vereda Humbo, Quípama, Boyacá; Para
Exploración De Esmeraldas Y Minerales Asociados.

Giovanny Santiago Salazar López

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Fernando Elí Romero Ordóñez

PhD en Mineralogía y Petrología

Codirectores

Carlos Alberto Ríos Reyes

PhD en Ciencias

Fabian Samuel Reyes Santos

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, a mi familia, a mis amigos.

Agradecimientos

A mi director de Tesis el Dr. Fernando Eli Romero Ordoñez por apoyarme, enseñarme y motivarme a culminar el proyecto de la manera más profesional.

A mis codirectores el Geólogo Fabian Reyes y el Dr. Carlos Ríos por su apoyo constante y consejos.

A la Universidad Industrial de Santander por darme la oportunidad de desarrollar mi carrera en sus espacios y a todas las personas maravillosas con quienes compartí esta maravillosa etapa.

Al Laboratorio de preparación de muestras del profesor Luis Anaya el cual me ayudo en la elaboración de las secciones delgadas y me brindó importantes sugerencias.

Al Laboratorio de difracción de rayos x en el parque tecnológico Guatiguará y su director el profesor José Henao por ayudarme con los primeros análisis de difracción.

A la Universidad Nacional de Colombia por abrirme las puertas tan cálidamente para el desarrollo total de mi proyecto de grado y todas las personas en la parte administrativa, profesoral y estudiantil que sin duda marcaron un momento importante de mi vida y en el desarrollo de este proyecto.

Al Grupo de Investigación GEGEMA de la Universidad Nacional por prestarme el Laboratorio de difracción de Rayos X, por enseñarme a manejar el equipo, la amabilidad de los encargados Juan David, Sofia y la amplitud en la que me permitieron hacer uso del equipo.

Al Laboratorio gemológico el Centro de Desarrollo de la Esmeralda Colombiana (CDTEC) y su director Javier García Toloza por abrirme las puertas para los análisis de fluorescencia de rayos x, espectroscopia y muchos otros aprendizajes y a todos sus trabajadores con alta calidad humana y mucho cariño me aportaron conocimientos valiosos.

Al Laboratorio de Microtermometría y Espectroscopia Micro-Raman, su director el profesor Juan Carlos Molano y el Geólogo Santiago Jiménez por prestarme sus equipos para el desarrollo de los análisis petrográficos y espectroscópicos que sumaron una parte importante a este proyecto y en especial por sus consejos y sugerencias.

Por último, pero no menos importante a Don Pablo, los titulares mineros y los trabajadores por permitirme realizar este proyecto en su área, por su hospitalidad y gran ayuda en todas las etapas de desarrollo del proyecto facilitando el uso de muestras y datos.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Planteamiento del Problema.....	17
2. Objetivos	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
3. Marco Teórico.....	19
3.1 Generalidades.....	19
3.2 Geología estructural	20
3.2.1 Método de los Diedros rectos	21
3.2.2 Indicadores cinemáticos.....	22
3.3 Geología Regional	23
3.3.1 Formación Muzo:.....	23
3.3.2 Formación Furatena:	23
3.3.3 Formación Capotes:	23
3.3.4 Formación Conejo:.....	23
3.3.5 Formación Umir:.....	23
3.3.6 Formación Lisama:	24
3.4 Fallas.....	24
3.4.1 Sistema Fallas La Salina:.....	24
3.4.2 Falla Topaipí:.....	25
3.4.3 Falla Itoco:	25
3.4.3 Falla de Tambrias:.....	25

3.4.4 Falla Guadualito:.....	25
3.5 Pliegues.....	26
Sinclinal de Guadualito:.....	26
3.6 Mineralización	28
4. Antecedentes	29
5. Metodología	30
5.1 Revisión bibliográfica y pre-campo:.....	31
5.2 Campaña de campo:.....	32
5.3 Trabajo de laboratorio:.....	32
5.3.1 Petrografía:.....	32
5.3.2 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM):	32
5.3.3 Difracción de Rayos X (DRX):.....	33
5.3.4 Espectroscopía Micro Raman:	34
5.3.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX):.....	34
5.4 Trabajo de oficina	34
5.5 Resultados y conclusiones:	35
6. Resultados	36
6.1 Rutas y afloramientos	36
6.2 Análisis estructural.....	39
6.3 Muestreo	43
6.4 Petrografía.....	45
6.5 Resultados de las técnicas analíticas cualitativas.....	51
6.5.1 SEM	51

6.5.2 Espectroscopia Micro-Raman.....	53
6.5.3 Inclusiones Fluidas (IF)	57
6.6 Resultados de las técnicas analíticas cuantitativas.....	59
6.6.1 DRX realizados en la Universidad Industrial de Santander.....	59
6.6.2 DRX realizados en la Universidad Nacional de Colombia:.....	60
6.6.3 FRX.....	62
7. Discusión.....	66
8. Conclusiones	68
9. Recomendaciones.....	70
Referencias Bibliográficas	72

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros Difractómetro.....	33
Tabla 2. Promedio de rumbo y buzamiento para las fallas de cada grupo.....	40
Tabla 3. Datos de las direcciones principales de esfuerzo.....	41
Tabla 4. Relación de estaciones, muestras y técnicas realizadas.....	44
Tabla 5. Valores semicuantitativos para los seis puntos realizados.....	53
Tabla 6. Tabla cuantitativa principales muestras minerales.	60

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de investigación.....	16
Figura 2. Estructuras que pueden formarse en el plano que contiene al tensor.....	22
Figura 3. Mapa Geológico regional	26
Figura 4. Sección del mapa geológico.....	27
Figura 5. Esquema de la metodología del proyecto.....	35
Figura 6. Estaciones y ruta de campo	37
Figura 7. Fotografías de afloramientos resaltando características estructurales.....	38
Figura 8. Esquema del cálculo tensorial.	40
Figura 9. Mapa geológico local	42
Figura 10. Testigos de las secciones delgadas.....	43
Figura 11. Sección Delgada E2-1	45
Figura 12. Sección Delgada E4-1	46
Figura 13. Sección Delgada E7-1	47
Figura 14. Sección Delgada E0-3	48
Figura 15. Sección Delgada E6S-1	49
Figura 16. Sección Delgada E9S-1	50
Figura 17. Sección Delgada E0-6	51
Figura 18. Fotografías BSE, SE y espectros del análisis semicuantitativo.....	52
Figura 19. Espectrograma para morralla de la muestra E0-1.....	54
Figura 20. Espectrograma para parisita de la muestra E0-5.	55
Figura 21. Espectrograma para pirofilita de la estación E9S-1	56

Figura 22. Espectrograma para calcita de la estación E4-1.	56
Figura 23. Espectrograma para calcita de la muestra E0-3.....	57
Figura 24. Inclusiones fluidas morralla muestra E0-1.....	58
Figura 25. Correlación de Pearson (r) para venas.....	62
Figura 26. Correlación de Pearson (r) para roca caja.....	63
Figura 27. Análisis de componente principal para roca venas.....	64
Figura 28. Análisis de componente principal para roca caja.	65
Figura 29. Etapas minerales y paragénesis de la esmeralda.	67

Lista de Apéndices

Los apéndices se encuentran adjuntos en el archivo del proyecto

Apéndice A. Rutas de la campaña de campo.

Apéndice B. Mapas geológicos.

Apéndice C. Datos estructurales.

Apéndice D. Difractogramas.

Apéndice E. Espectros de Micro-Raman.

Apéndice F. Fluorescencia de rayos x.

Resumen

Título: Caracterización mineralógica, petrográfica y estructural de las venas del contrato de concesión GD1-081 ubicado en la vereda Humbo, Quípama, Boyacá; Para exploración de esmeraldas y minerales asociados*

Autor: Giovanni Santiago Salazar López**

Palabras Clave: Esmeraldas, Venas, Hidrotermal, Petrografía, Geoquímica.

Descripción:

El hidrotermalismo en el cinturón esmeraldífero occidental está vinculado a la integración y mezcla de fluidos hipersalinos de diferentes asociaciones temporales desde 60-12 M.a, emplazados en rocas del Cretácico Inferior dentro de una cuenca que experimentó procesos de colmatación, seguido de inversión tectónica para evolucionar como la Cordillera Oriental de Colombia. En el distrito minero de Quípama, se presentan venas, filones y brechas alojados en rocas que abarcan desde el Cretácico Inferior hasta el Paleoceno; litológicamente corresponden a lodolitas negras con variaciones notables en el tipo de ocurrencias de esmeralda y minerales asociados. La presencia de carbonatos y micas enriquecidas en elementos de tierras raras (REE) y cromóforos (Cr, V, Fe) se asocia frecuentemente con mineralizaciones de esmeraldas para etapas tempranas o tardías del fluido. Estos minerales pueden utilizarse como posibles indicadores utilizando técnicas de análisis composicional, evaluando la disponibilidad de cromóforos en zonas de debilidad tectónica y relleno mineral. Este estudio integra datos obtenidos en campo, estructurales y litológicos, junto con técnicas petrográficas y geoquímicas realizadas para definir las asociaciones minerales presentes en Humbo. Los resultados de estos análisis se utilizan para desarrollar hipótesis que pueden explicar las posibles zonas y asociaciones de interés exploratorio, complementando investigaciones previas del cinturón occidental y las esmeraldas del norte de Quípama.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa de Geología. Director: Fernando Elí Romero Ordoñez. PhD. En Mineralogía y Petrología. Codirector: Carlos Alberto Ríos Reyes. PhD. en Ciencias Aplicadas. Codirector: Fabian Reyes Santos. Geólogo.

Abstract

Title: Mineralogical, petrographic, and structural characterization of the veins in concession contract GD1-081 located in the Humbo area, Quípama, Boyacá; for emerald and associated mineral exploration*

Author(s): Giovanni Santiago Salazar López **

Key Words: Emeralds, Veins, Hydrothermal, Petrography, Geochemistry.

Description:

Hydrothermalism in the western emerald belt is linked to the integration and mixing of hypersaline fluids of different temporal associations from 60-12 M.y., emplaced in Lower Cretaceous rocks within a basin that underwent processes of collimation, followed by tectonic inversion to evolve as the Eastern Cordillera of Colombia. In the Quípama mining district, there are veins, seams and breccias hosted in rocks that range from the Lower Cretaceous to the Paleocene; lithologically they correspond to black mudstones with notable variations in the type of emerald occurrences and associated minerals. The presence of carbonates and micas enriched in rare earth elements (REE) and chromophores (Cr, V, Fe) is frequently associated with emerald mineralization for early to late fluid stages. These minerals can be used as possible indicators using compositional analysis techniques, evaluating the availability of chromophores in zones of tectonic weakness and mineral infill. This study integrates field, structural and lithological data, along with petrographic and geochemical techniques performed to define the mineral associations present at Humbo. The results of these analyses are used to develop hypotheses that may explain possible zones and associations of exploratory interest, complementing previous investigations of the western belt and northern Quípama emeralds.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Geology Program. Director: Fernando Elí Romero Ordoñez, PhD in Mineralogy and Petrology. Co-director: Carlos Alberto Ríos Reyes, PhD in Applied Sciences. Co-director: Fabian Reyes Santos, Geologist.

Introducción

Las esmeraldas colombianas son únicas y apetecidas en el mundo de la joyería y la gemología por sus características físicas (inclusiones, estructura cristalina) y ópticas (color, brillo, refracción) las cuales hacen que tenga diferencias de calidad respecto a las esmeraldas de otras partes del mundo que desde el punto de vista científico es sabido que la historia genética, evolutiva y de emplazamiento de los fluidos originadores de estos minerales hacen posible dichas propiedades. Entre los principales municipios productores de la esmeralda se encuentran Muzo, San Pablo de Borbur, Maripí, Quípama, Gachalá y Chivor. Para el país y la comunidad local representa una fuente importante de ingresos.

Analizando las estadísticas económicas de la última década se ha visto un decaimiento en la producción y exportación de este mineral (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2024a). En el primer trimestre de 2023 se declara escasez de esmeraldas, por tanto, un elevado incremento de su precio. La dificultad de conseguir licencias ambientales para nuevos títulos mineros ayuda a que este comportamiento continúe (Hay escasez de esmeraldas, ¿qué está pasando?, 2023). Sin embargo, los datos también muestran que cada vez hay más personas trabajando en el gremio esmeraldífero y que ha crecido el interés de inversión extranjera directa para minería en general en los dos últimos años (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2024b).

El área de estudio corresponde al contrato de concesión minera GD1-081 ubicado en la Vereda Humbo, municipio de Quípama, departamento de Boyacá, Cinturón Esmeraldífero Occidental de Colombia (Figura 1), el título cuenta con un área total de 2.6 km². Este se encuentra en etapa exploratoria donde se está ejecutando evaluación de mineralogía, petrografía, geoquímica

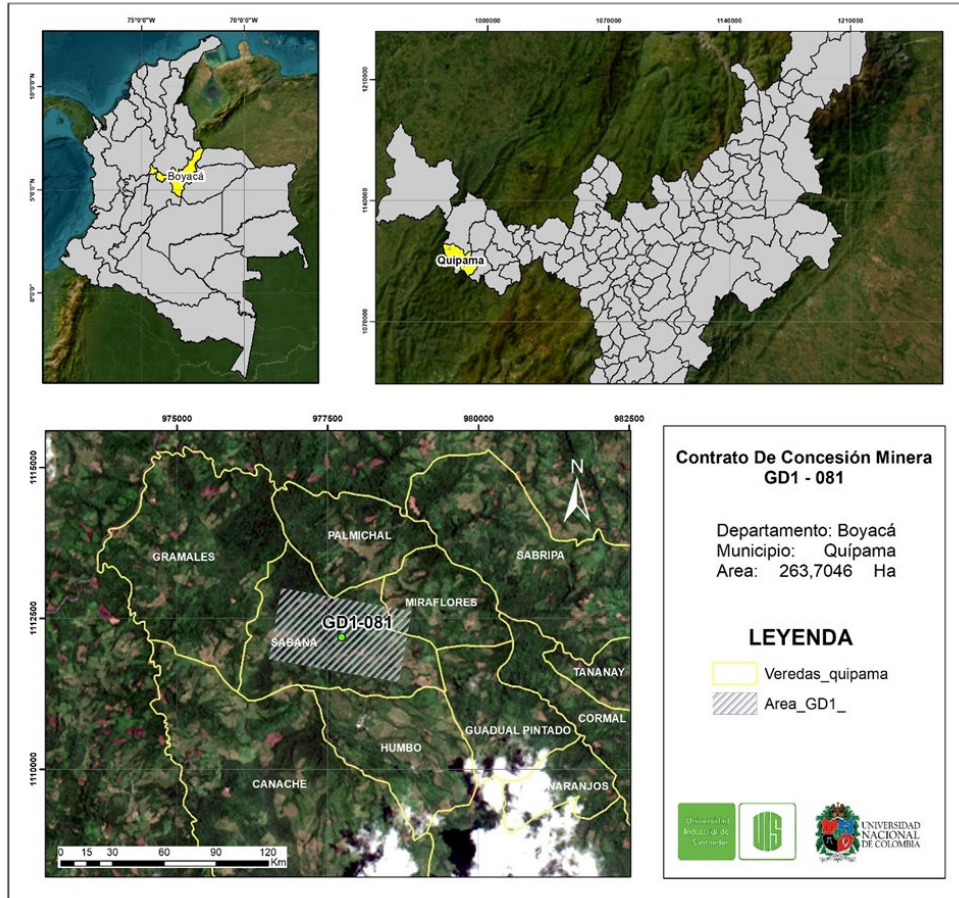
y geología estructural. Este proyecto se basa en aportar información de interés geológico para ayudar a la continuación del desarrollo de estos procesos.

El municipio de Quípama limita al norte con Otanche, al este con Muzo, al sur y al oeste con el departamento de Cundinamarca cuenta con 61 títulos mineros, 28 solicitudes vigentes y 7 propuestas de contrato de concesión. En 1956, el poblado se convirtió en una inspección del municipio de Muzo y en 1986 fue elevado a municipio. Los habitantes se dedican principalmente a la minería, pero también ganadería y agricultura. Cuenta con un área de 182Km², la vía de acceso a Humbo tiene una distancia de 36km por carretera destapada (Secretaría de Turismo, Gobernación de Boyacá, s.f.).

Para esta investigación se realizaron trabajos de campo para definir las formaciones sedimentarias y estructuras asociadas a esta mineralización, junto con estudios petrográficos de venas, brechas y filones planteando su posible relación con la esmeralda. Igualmente, se realizaron estudios analíticos para documentar características físicas, químicas y mineralógicas de la esmeralda teniendo en cuenta minerales asociados. Las técnicas desarrolladas incluyen Petrografía, Difracción de rayos X (DRX), microscopia electrónica de barrido (SEM), Espectroscopía micro Raman y Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Figura 1.

Localización del área de investigación.



Nota: Se aprecia el área del título minero y las veredas colindantes donde la principal y más habitada es Humbo, por eso a todo el sector se le dice con este nombre. Mapas base obtenidos de IGAC y Earthstar Geographics

1. Planteamiento del Problema

El municipio de Quípama ha tenido a lo largo de su historia importantes producciones esmeraldíferas en sus minas, entre los últimos datos destaca la mina La Pava en (González et al. , 2021). Sin embargo, al analizar las estadísticas de la última década se ha visto un decaimiento en la producción y exportación de este mineral (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2024a), exceptuando algunos picos de explotación en el 2020.

Esta situación contrasta con la cantidad de personas trabajando en el gremio esmeraldífero lo cual ha venido en aumento este último año, además el interés de inversión extranjera directa para la exploración de nuevos títulos mineros y la minería de esmeraldas en general ha incrementado en los últimos dos años (Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME, 2024b). Es por esta razón que por medio del actual proyecto se busca no solo encontrar nuevas áreas potenciales para la extracción de esmeraldas sino la generación de nueva información de la zona de estudio a partir del análisis de venas, brechas y filones hidrotermales encontrados en el título minero GD1-081, generando consigo desarrollo, entendimiento del territorio y posiblemente futuras oportunidades laborales para la comunidad local.

Los datos recolectados en campo, los análisis de laboratorio y su posterior interpretación buscan plantear hipótesis que puedan responder a las preguntas de investigación: ¿qué mineralogía se presenta en el área?, ¿qué tendencia estructural se evidencia? y las asociaciones minerales de esmeralda ya estudiadas para el CEOC, ¿tienen relación con la información recolectada del área de estudio?

2. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar petrográficamente a las venas hidrotermales presentes en el área de estudio planteando hipótesis sobre los posibles eventos e implicaciones geológicas sobre su transporte y entrapamiento.

1.2 Objetivos Específicos

Analizar la petrografía y mineralogía de las manifestaciones hidrotermales por medio de la elaboración de secciones delgadas, microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos x (DRX), espectroscopía Micro-Raman y fluorescencia de rayos x (FRX).

Proponer hipótesis a partir de los datos estructurales y geoquímicos conseguidos.

Correlacionar la información adquirida con la bibliográfica existente, buscando proponer un aporte según las características observadas.

3. Marco Teórico

3.1 Generalidades

Diferentes eventos geológicos han controlado la distribución, génesis, formación, relleno y estructuras de las cuencas sedimentarias. Los cinturones esmeraldíferos colombianos: oriental (CEOR) y occidental (CEOC) se localizan cerca de los piedemontes de la Cordillera Oriental; morfológicamente toda el área es montañosa y se caracteriza por relieve moderado a fuerte, en general, con drenaje subparalelo y subdendrítico de densidad media y desarrollo de valles juveniles. (Instituto Colombiano De Geología Y Minería [INGEOMINAS], 2006, p. 13). Los ríos que drenan el área de interés pertenecen a la cuenca hidrográfica del río Magdalena las principales quebradas que afectan al área de interés son: Caracoles, Ruiz y López afluentes de la quebrada principal La Torrás. Esta a su vez es afluente del Río Chirche.

La Cordillera Oriental de Colombia es una barrera topográfica clave, influye en el clima, la erosión y el transporte de sedimentos a ríos y deltas importantes. Su formación modeló cuencas sedimentarias como el Valle del Magdalena y los Llanos. Su extenso registro estratigráfico, desde el Jurásico Superior hasta el Neógeno, ofrece valiosas perspectivas sobre la sedimentación pre y post-deformacional (Horton et al., 2020). Se considera un cinturón plegado y fallado de antepaís, asimétrico y bivergente resultante de la inversión Neógena de antiguas fallas normales en una cuenca de retroarco con transporte tectónico al SE la cual continúa levantándose. (Branquet et al., 1999a).

En los cinturones esmeraldíferos CEOC y CEOR se preservó uno de los registros sedimentarios más completos del Cretácico del país. Las principales mineralizaciones de esmeraldas se hospedan, para el caso del CEOC en las formaciones lodosas y calcáreas Muzo

(Hauteriviano-Barremiano) y Rosablanca (Valanginiano inferior). La sedimentación fue sobre fondos marinos de costa-afuera en condiciones anóxicas, reductoras y ricas en materia orgánica. (INGEOMINAS, 2006, p. 11).

Este aporte de sedimentos fue “proveniente tanto del Dominio Oriental (Cratón de Guyana) como del Dominio Central (paleomacizo de Santander o regiones que actualmente ocupan el Arco de Natagaima y Cordillera Central) a medida que el mar Cretácico avanzaba predominantemente en sentido NE o SW” (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2011, p. 23).

3.2 Geología estructural

Los cinturones esmeraldíferos se encuentran plegados y afectados por tectónica transpresiva que se manifiesta por la presencia de fallas inversas con salto transcurrente, aunque también se encuentran cabalgamientos muy importantes como el Sistema de Fallas de La Salina en el CEOC; la mayoría de las estructuras se orientan en sentido SW-NE. Se registra un evento extensivo en el Berriasiano-Hauteriviano (144 a 127 Ma) generó una semi-cuenca extensional originó las litologías del CEOC, menos desarrollado tectónicamente que en el CEOR. (SGC, 2011, p. 23). Este evento extensivo junto con subsidencia asociada a fallamiento normal contemporáneo con la sedimentario favoreció la acumulación de grandes espesores de shales negros, silíceos y carbonatados, con intercalaciones de arenisas, limolitas, cherts, etc. (SGC, 2011, p. 24).

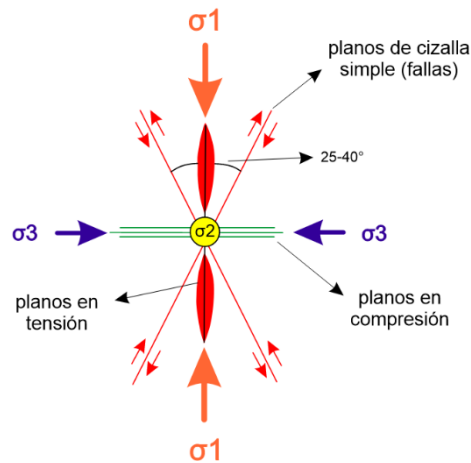
La fase principal de levantamiento ocurrió en el Mioceno medio afectando estructuras como fallas normales transformándolas en inversas, en echelon, pliegues de despegue, etc. que en algunos casos afectaron el basamento (SGC, 2011, p. 26).

3.2.1 Método de los Diedros rectos

El método de los diedros rectos desarrollado por Angelier y Mechler (1977), se usa para calcular las orientaciones de los paleoesfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3) que controlan la cinemática de las estructuras tectónicas, el método asume que, en cada falla, las orientaciones de compresión máxima (σ_1) y mínima (σ_3) se sitúan en los cuadrantes o diedros P y T respectivamente, a lo largo de un plano de movimiento, mientras que el σ_2 está a 90° de la estría en el plano de falla (Figura 2). El método de los diedros rectos es confiable si se dispone de suficientes datos. No basta con una única orientación se necesita al menos dos conjuntos de datos para mejorar la precisión en el cálculo de las orientaciones de σ_1 , σ_2 y σ_3 . Aunque los resultados no serán 100% precisos, contar con múltiples orientaciones y cinemáticas compatibles proporciona estimaciones más precisas del estado de paleoesfuerzos que controlaron la cinemática de la falla. Gracias a la clasificación de Angelier y Mechler (1977), las mediciones de buzamientos y pitch o rake, se determina si las estructuras estudiadas se produjeron mediante movimientos de desgarre, oblicuos o paralelos a la dirección de buzamiento.

Figura 2.

Estructuras que pueden formarse en el plano que contiene al tensor.



Nota: Ejes de tensiones principal: σ_1 , menor: σ_3 e intermedio σ_2 el cual está normal a la página.

Tomado y adaptado de (Fossen, 2010), (Marjoribanks, 2015).

3.2.2 Indicadores cinemáticos

Las fallas se manifiestan a través de una discontinuidad en las rocas a lo largo de una superficie de falla, donde la roca en ambos lados suele estar pulida debido al movimiento friccionante y a los esfuerzos aplicados (Davis et al., 2011). Para determinar el sentido y dirección de movimiento entre bloques rocosos separados por zonas de cizalla, se utilizan indicadores cinemáticos (Fossen, 2010). Estos indicadores están dados por estrías con escalones de falla, fibras minerales, fracturas tipo riedel, clivajes, etc., evidencian la variación y propagación del campo de esfuerzos de un área (Angelier, 1984). En este estudio se recopilieron datos de estrías de falla con escalones.

3.3 Geología Regional

3.3.1 Formación Muzo:

No está presente dentro del título, pero si en las cercanías, 1 km hacia el Noroeste. Corresponde a lodolitas calcáreas, silíceas, albitizadas o no calcáreas intercaladas con sales, limolitas y areniscas de tamaño de grano fino a muy fino. Esta Formación es de edad Hauteriviano – Barremiano. (INGEOMINAS, 2006, p. x)

3.3.2 Formación Furatena:

No está presente dentro del título, pero si en las cercanías, son intercalaciones de arcillolitas carbonosas, lodolitas con yeso y piritita, en ocasiones calcáreo, hacia el tope hay presencia de shales, la edad corresponde al Valanginiano. Junto con la Formación Muzo es donde se encuentran los depósitos esmeraldíferos más importantes de la zona. (INGEOMINAS, 2006, p. x)

3.3.3 Formación Capotes:

Aflora en el 50% del área del contrato (medido con ArcMap), comprende arcillolitas, limolitas, lutitas, shales calcáreos oscuros de edad Albiano medio. Cáceres et al 1969. Presencia de cloritoide ocasionalmente y crenulaciones. Las arcillolitas pueden denominarse pizarras o meta-arcillolitas. (INGEOMINAS, 2006, p. x), (Mantilla et al. , 2006).

3.3.4 Formación Conejo:

Aflora en un 0.1% del área del contrato, del Turoniano – Santoniano presenta niveles de arcillolitas, arcillolitas limosas, limolitas silíceas y lodolitas con concreciones, cambio en el ambiente de sedimentación de plataforma profunda a plataforma media. Etayo 1968.

3.3.5 Formación Umir:

Aflora el 12 % del área del contrato. De edad Campaniano-Maastrichtiano, hacia la tope muestra lodolitas grises, lentes de carbón e intercalaciones de areniscas hasta arcillolitas con

concreciones férricas. Hacia la base arcillolitas naranjas, lodolitas laminadas, con láminas micáceas, carbonosas y concreciones. Morales et al., 1958.

3.3.6 Formación Lisama:

Aflora en el 38% del área. De edad Paleoceno, la caracterizan en la parte inferior areniscas limosas y en la parte superior arcillolitas carbonosas y micáceas, limolitas con estratificación inclinada. Morales et al., 1958.

3.4 Fallas

3.4.1 Sistema Fallas La Salina:

La Falla de La Salina tiene su trazo principal sobre el río Chirche, en el límite occidental del área; su influencia tectónica esta situada al oriente producida por cabalgamientos con vergencia al occidente, con menores retrocabalgamientos. Tiene una dirección predominante de N30°-40°E. Los ejes de los sinclinales de Otanche y Guadualito terminan escalonadamente sobre las fallas del sistema indicando una componente dextral. Este sistema repite secuencia de la Formación Capotes y en el trazo más occidental coloca rocas de la Formación Muzo y Capotes, sobre rocas del Turoniano. La Falla de Guadualito que es uno de los ramales de este sistema en la parte oriental, con dirección noreste a la altura del río Aldana, hacia el sur se aleja del trazo principal, este hecho hace que, aunque las formaciones siguen teniendo una vergencia al occidente, los pliegues caen oblicuos a su trazo e indican un movimiento transcurrente asociado en sentido sinextral. La Falla de Guadualito también pone en contacto a las unidades de Muzo y Furatena, sobre rocas de la Formación Capotes. Por el salto estratigráfico que muestra la Falla La Salina y su extensión geográfica, se constituye como la estructura geológica más importante del Cinturón Esmeraldífero Occidental. (INGEOMINAS, 2006, p. 31)

3.4.2 Falla Topaipí:

tiene una dirección norte-sur a noreste-suroeste. Al norte se inicia como una transferencia de la Falla Tambrías; con cabalgamiento vergente al oriente; coloca rocas de las Formaciones Furatena, Muzo y Capotes sobre rocas de la Formación Pacho. (INGEOMINAS, 2006, p. 31)

3.4.3 Falla Itoco:

Para la falla transversal (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 en el contexto regional tiene un movimiento sinistral, levanta el bloque norte sobre el del sur, a tal punto que coloca rocas de la Formación Muzo, sobre rocas de la Formación Capotes. (INGEOMINAS, 2006, p. 31)

3.4.3 Falla de Tambrias:

Esta falla en el sector de Otanche. Se trata de una falla de cabalgamiento con vergencia al occidente, con el salto más grande al nororiente de Otanche, donde coloca rocas de la Formación Muzo, sobre rocas de la Formación Otanche. (INGEOMINAS, 2006, p. 30)

3.4.4 Falla Guadualito:

Tiene vergencia al oeste y coloca rocas de las Formaciones Muzo y Capotes, sobre rocas de la Formación Capotes, hacia el sur corresponde a una falla sinistral con salto inverso (vergenza noroeste), orientada SSO-NNE. La dirección general del plano de falla es N10°E con buzamiento alto al sureste. (INGEOMINAS, 2006, p. 31)

3.5 Pliegues

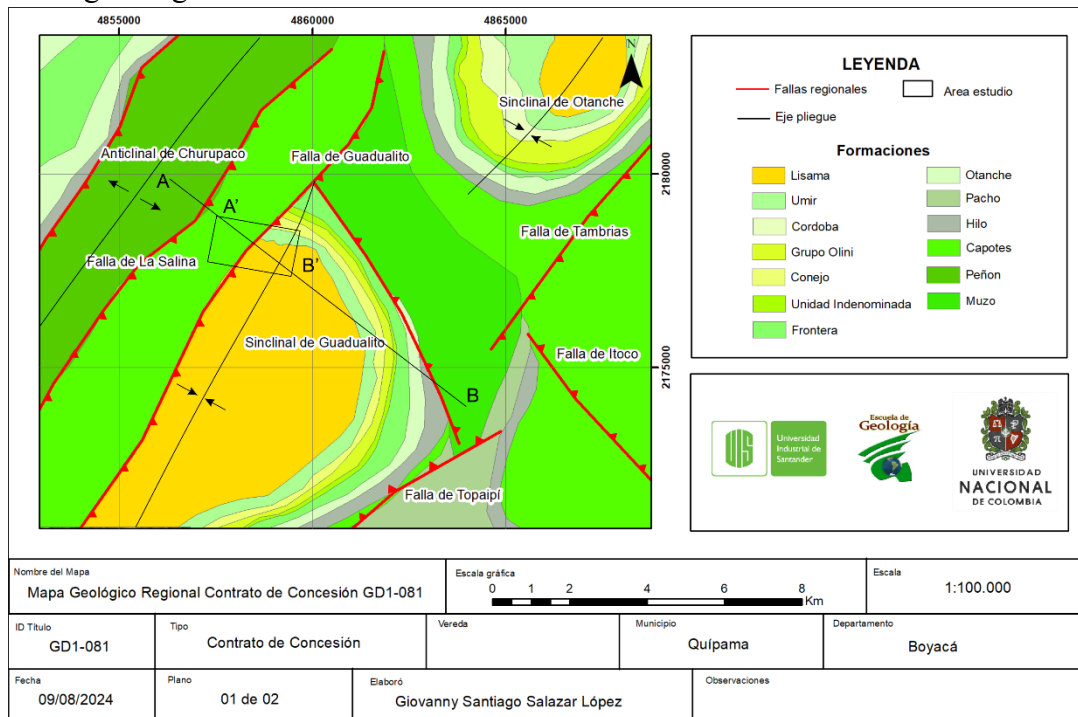
Sinclinal de Guadualito:

Localizado en los alrededores de las veredas de Guadualito y Humbo; Tiene orientación entre N10°W y N30°E, amplitud de 7 Km. y una longitud de 15 Km. El flanco oriental está limitado por la Falla de Topaipí y el occidental por una falla satélite del sistema de La Salina y Guadualito. Esta estructura contiene una secuencia que va desde la Formación Muzo, hasta la Formación Lisama. El Sinclinal de Guadualito es litoestratigráficamente similar al Sinclinal de Otanche y de Santa Helena. (INGEOMINAS, 2006, p. 38)

Utilizando esta información se elaboró el mapa geológico regional y el perfil geológico. (Figuras 3 y 4). Los mapas se pueden visualizar en el apéndice B.

Figura 3.

Mapa Geológico regional

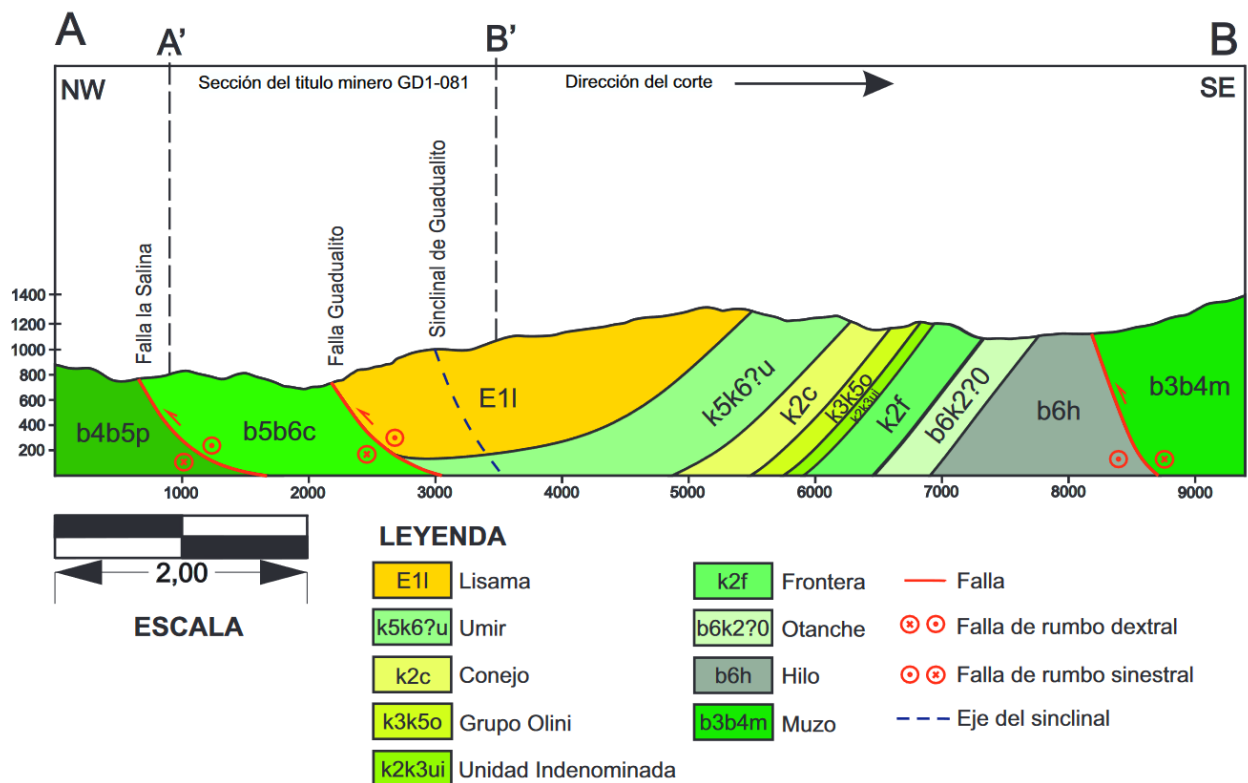


Nota: Insumos del mapa obtenidos de la plancha 189 La Palma del Servicio Geológico Colombiano. Servicio Geológico Colombiano. (2008). Escala 1:100.000.

En la sección geológica de la Figura 4, se evidencia el área del título con A' y B', y en la figura 3 se encuentra el trazo y la ubicación de estos puntos. La línea de la sección se decidió trazar perpendicular a los rumbos de las principales formaciones que influyen el área de investigación.

Figura 4.

Sección del mapa geológico



Nota: Insumos del mapa obtenidos de la plancha 189 La Palma del Servicio Geológico Colombiano. Servicio Geológico Colombiano. (2008). Escala 1:100.000. El trazo del corte se puede ver en la Figura 3.

3.6 Mineralización

El contexto genético de las esmeraldas más aceptado a través de estudios de inclusiones fluidas, microtermometría y geoquímica es el del origen sedimentario que corresponde a una interacción roca (calcárea – carbonosa) con fluidos hipersalinos de procedencia evaporítica autóctonos, en donde los fluidos mineralizantes se originaron por la interacción de aguas meteóricas y connatas con las lodolitas negras, lixiviando el berilio, cromo y vanadio de las rocas encajantes. (Maya et al. , 2004).

Uno de los modelos más aceptados sobre la génesis de las esmeraldas colombianas es propuesto por Cheilletz y Giuliani (1996), donde los fluidos hidrotermales involucran la generación de salmueras provenientes de la disolución de evaporitas por aguas calientes de la cuenca. Asociado a este proceso, se presenta metasomatismo de Na y Ca en shales negros y simultáneamente lixiviación de Berilio, Cromo y Vanadio de los shales para finalmente darse la precipitación de la esmeralda en venas, cavidades y brechas (Branquet et al. , 1999b).

Los fluidos salinos connatos y calientes sirvieron como transporte del berilio, cromo y vanadio, estas salmueras disolvieron niveles evaporíticos y dejaron evidencia del metasomatismo Sodio-Calcio en las lodolitas negras en forma de alteraciones como albitización y carbonatización. La reducción termoquímica de los sulfatos permitió la precipitación de pirita, dolomita, calcita y esmeralda. La edad aceptada para este evento en el CEOC es en el límite Eoceno-Oligoceno, esta mineralización se halla en brechas cataclásticas, venas, filones, etc. Para el CEOC estratigráficamente estos niveles evaporíticos se encontraban por debajo de rocas calcáreas, dolomías, lodolitas negras, etc, y ocasionaron que el fluido estuviera sobre-presionado hasta llegar a un punto de máxima presión en el cual escapo a través de fracturamiento hidráulico cercano a

zonas de cizalla y debilidad. (Banks et al. , 2000)

Estudios microtermométricos indican la presencia de sales ricas en H₂O – NaCl – KCl – KCl₂ – CO₂ – N₂ presentes en las inclusiones fluidas de las esmeraldas, así como carbonatos y pirita (Cheilletz et al., 1994). Estas inclusiones fluidas tienen una salinidad aproximada de 40% en peso de NaCl y que pueden contener cantidades significativas de Ca, K, Fe y Mn y minerales de saturación como halita, calcita, dolomita, parisita, siderita, pirita, esfalerita y silicatos, igualmente hay presencia de salmueras CaCl₂ – NaCl, siendo la temperatura de homogenización total de la inclusión 300°C – 350°C y presiones de 1,3 – 1,5 K (Giuliani et al. , 1995).

Área de Coscuez; Meza, (2007) expone datos termobarimetricos para la formación de esmeraldas: temperatura: 204- 386 °C 300, presión: 1000 bares, para una profundidad de 4km. menciona un carácter epitermal del fluido. Utilizando geoquímica isotópica, sugiere que el origen de sulfuros ocurre a partir de la reducción de sulfatos por materia orgánica. El oxígeno y carbono proviene de la disolución de calizas. Indica procedencia de los fluidos derivada de reacciones de eventos metamórficos a profundidad y una fuente adicional de fluidos alóctonos.

4. Antecedentes

En García et al. , (2023a) mencionan que la roca huésped no alterada presenta valores altos de Cr y V. Afirman que las micas absorbe cromóforos con facilidad en las etapas tempranas del fluido. Comentan que en el CEOC hay mayor disponibilidad de vanadio y que la pirofilita tiene capacidad de absorberlo en etapas tardías. Concluye que el estudio de las micas podrían ser un indicador de venas portadoras de esmeralda junto con anomalías negativas de Cr y V en la roca caja.

García et al. , (2023b) menciona que las esmeraldas del CEOR (Cinturón Esmeraldífero Oriental) presentan concentraciones mayores de cromo otorgándoles un color característico color azul. La tasa promedio de relación Cr/V es de 0.25.

(González et al. , 2021) asocia las venas productivas de la mina la Pava con anomalías positivas de Y, P, Mn, y Mg y negativas de Li, Cs, Be, Ti y mineralogía albíta, fluorapatito, calcita, dolomita, entre otros. Concluye una relación Cr/V de 0.71. Señala que los sulfuros y los filosilicatos deben tratarse con precaución a la hora de mencionar indicadores. Sugiere que los anticlinales por propagación de fallas inversas está relacionado con la depositación de esmeraldas.

(Sánchez et al, 2011, diapositiva 27) Muestran un modelo geofísico y varios cortes cronológicos de la Falla La Salina y la Falla de Topaipí, las cinemáticas y estructuras, van acorde a los datos de la Plancha 189 (Servicio Geológico Colombiano, 2008).

Ortega, (2007) En el área de Coscuez menciona roca encajante del hidrotermalismo limolitas. Sugiere mezcla entre fluido mineralizante y meteórico, propone origen marino para los carbonatos de las venas.

En Plata, (2007) se menciona origen de los fluidos hidrotermales metasedimentario.

Peña, (2007) menciona que la presencia de cloritoide rico en hierro y pirofilita, está relacionado con un metamorfismo de bajo grado de facies esquistos verdes, zona de la clorita, ocasionado por un evento hidrotermal local que afecta las formaciones Tablazo, Capotes y Pacho.

5. Metodología

Metodología compuesta por: 1). Búsqueda bibliográfica y pre-campo (Imágenes satelitales, reconocimiento del terreno). 3). Campaña de campo (toma de muestras y datos estructurales). 4).

Trabajo de laboratorio: Secciones delgadas, Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia Micro Raman, Fluorescencia de Rayos X (FRX). 5). Trabajo de oficina (procesamiento de la información), elaboración de mapas y del modelo estructural. 6). Resultados y conclusiones (Figura 5).

5.1 Revisión bibliográfica y pre-campo:

El desarrollo de las dos rutas recorridas en campo se diseñó pensando en maximizar la cantidad de afloramientos que se podían ver puesto que es una zona que no posee muchos a simple vista. Se desarrollaron siguiendo el trazo de dos pequeñas quebradas (quebrada Ruiz – Ruta 1 y quebrada López – Ruta 2) afluentes de la quebrada principal La Torrás (Figura 6), también se pueden visualizar en el apéndice A.

En el área existen un par de labores exploratorias denominadas: Santa Teresa y Santa Rita a ambos se llegaba por la Ruta 2. Se logró conseguir muestras minerales inéditas de los tuneles las cuales se clasificaron y analizaron con el siguiente código: del tunel Santa Teresa: morrallas E0-1, E0-2; parisita E0-5, E0-6 y fuchsita E0-6. Del tunel Santa Rita: material amorfo E0-3, E0-4. En campo no se tenía certeza de a que mineral correspondían estas muestras (se llega a las deducciones a través de los análisis de laboratorio). Actualmente no está disponible el acceso a estas labores por consecuencia de derrumbes y movimientos en masa que bloquearon los trayectos y las bocaminas.

Para el desarrollo de la revisión bibliográfica, se reúne la información correlacionable a la génesis, evolución y emplazamiento de las unidades litológicas y manifestaciones hidrotermales presentes en el CEOC.

5.2 Campaña de campo:

Reconocimiento de las litologías presentes toma de datos estructurales, búsqueda de indicadores cinemáticos, muestreo y cartografía preliminar. Elaboración del mapa geológico disponible en el apéndice B.

5.3 Trabajo de laboratorio:

Para entender las manifestaciones hidrotermales se lleva a cabo la adecuación de las muestras para diferentes técnicas analíticas. Se realiza con las muestras extraídas de las estaciones de campo. Para todos los análisis el código de la muestra es el mismo de la estación y se puede relacionar con la tabla 4.

5.3.1 Petrografía:

Se realizaron 7 secciones delgadas de las venas más representativas corresponde al análisis de laboratorio primario que cualquier proyecto petrográfico necesita. Se llevo a cabo en el Parque Tecnológico Guatiguará, las cuales se fotografiaron, clasificaron y describieron en un microscopio marca Carl Zeiss. Corresponden a las muestras: E0-3, E0-6, E2-1, E4-1, E7-1, E9S-1, E6S-1.

5.3.2 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM):

En este método se utilizó la técnica de espectrometría de dispersión de energía (EDS) con un microscopio electrónico de barrido, marca FEI Quanta 650 FEG ambiental para realización de análisis semicuantitativo por sectores. Laboratorio microscopia electrónica, Parque Tecnológico Guatiguará (UIS). Se aplica este método para entender mejor la posible estructura y geometría de la muestra E0-3.

5.3.3 Difracción de Rayos X (DRX):

El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci, en el Laboratorio de difracción de rayos x en el Parque Tecnológico Guatiguará y en el laboratorio de difracción de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Se realiza este método para comprobar la mineralogía de las secciones delgadas. Condiciones del difractómetro:

Tabla 1.

Parámetros Difractómetro

Variable	Valor
Voltaje (kV)	40
Corriente (mA)	40
Rendija de Divergencia (mm)	0.6
Rendijas Soller Primario (°)	2.5
Rendijas Soller Secundario (°)	2.5
Tamaño de Paso (° 2Theta)	0.02035
Tiempo por paso (s)	0.6
Rango de registro (° 2 Theta)	2,0 a 70,0
Radiación	CuK α 1
Filtro	Níquel
Uso de Anti-dispersor de Aire	Si
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	Apasos
Observaciones	Ninguna

Se tuvo la oportunidad de llevar a cabo el análisis presencialmente. Las muestras se filtran utilizando pinzas de picking para separar el material que se deseaba analizar para las estaciones de venas (E9S-1, E9S-2, E9S-3, E3, E1. 0, E5, E6, E01, E4, E5S-1, E5S-2, , E0-3,) y para las estaciones de roca caja (E2-1, E2-2, E9, E26, E2S, E11) luego con un mortero de ágata se tritura el material, se vierte en un porta-muestras inerte y se introduce en el difractómetro, PDFs disponibles en el apéndice D.

5.3.4 Espectroscopía Micro Raman:

Se usó un equipo Renishaw acoplado a un microscopio leika, un láser de 532 nm, tiempo de exposición de 2 segundos potencia del láser de 10% y 30 de acumulación. Los minerales pueden tener uno o más modos vibracionales en forma de respuesta a la interacción con la luz mediante un rayo incidente a una longitud de onda específica monocromática constante. Este análisis es útil porque es una técnica no destructiva a diferencia del DRX o FRX que la mayoría de las veces requieren que la muestra este pulverizada.

5.3.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX):

Se utilizó un espectroscopio de fluorescencia Energy-Dispersive X-ray Fluorescence (EDXF) marca Bruker en las instalaciones del Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana (CDTEC) en Bogotá. Con un tubo de rayos x de 50 watts. Se corrió con análisis de óxidos, desde los elementos químicos Na hasta Am. Se analizaron muestras de venas de las estaciones: y de roca caja de las estaciones: E5S-2, E0-3-1, E3-1. Los datos y tablas están disponibles en el apéndice F.

5.4 Trabajo de oficina

En esta parte se lleva a cabo el procesamiento de la información petrográfica, geoquímica y estructural. Se utiliza análisis estadístico para el procesamiento de los datos de Fluorescencias pues permite ver las variables elementales de forma más clara junto con posibles relaciones o varianzas entre estas. Para la parte estructural se desarrolla el método de los diedros rectos con los datos de fallas obtenidos en campo. Estos datos estructurales se pueden ver en el apéndice C, donde se

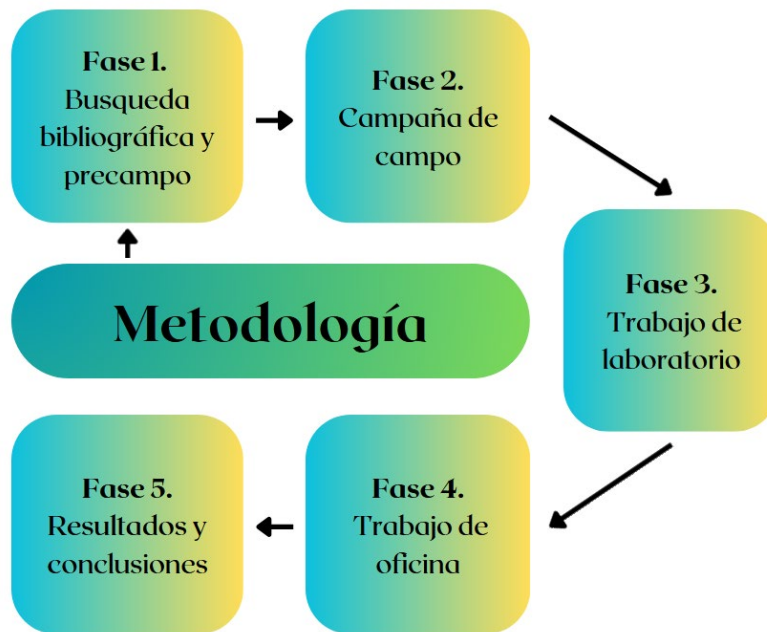
resalta en amarillo los que se utilizaron para el procesamiento.

5.5 Resultados y conclusiones:

Los resultados y su correcta interpretación van de la mano con las conclusiones del proyecto, para la elaboración de estas secciones se definen las relaciones petrográficas, geoquímicas y estructurales, a partir de interpretaciones de todos los análisis realizados vistos como conjunto de información.

Figura 5.

Esquema de la metodología del proyecto



6. Resultados

Se busca si existe o no relaciones estructurales, petrográficas y analíticas siguiendo el plan de trabajo y la metodología en busca de dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas al principio del proyecto.

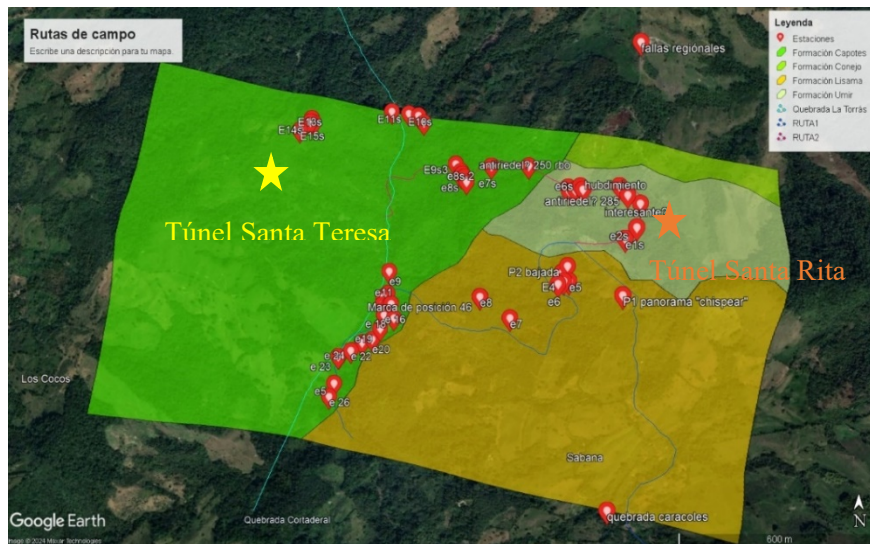
6.1 Rutas y afloramientos

Se planearon dos rutas como se explica en la metodología, en la Figura 6 se observa su trazo, las estaciones, y la ubicación de los tuneles Santa Rita y Santa Teresa. Para mejor visualización ver apéndice A.

En la Ruta 1, por la quebrada Ruiz se observan afloramientos con litologías tipo lodolitas negras y grises silíceas de la Formación Lisama con presencia de materia orgánica intercalada con arcillolitas naranjas, niveles con pirita, yeso y venas hidrotermales caracterizadas por calcita 8-10 cm, carbonatos de color marrón oscuro y láminas de 3mm de clorita, en menor medida algunas intercalaciones de areniscas finas con alto contenido de materia orgánica (Figura 7).

Figura 6.

Estaciones y ruta de campo



Nota: Las estrellas marcan la ubicación de los túneles, el resto tiene la relación con la leyenda del mapa en la esquina superior derecha.

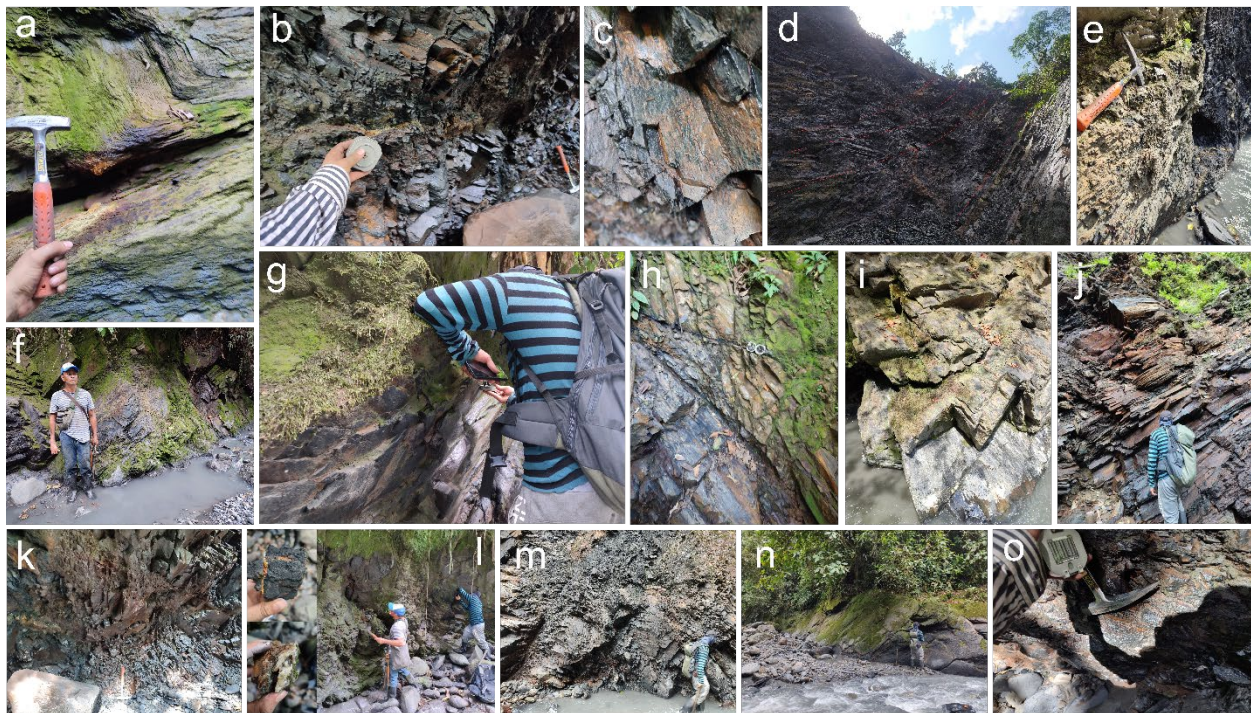
Bajando por el trayecto de la quebrada Ruiz hacia La Torrás se presenciaron afloramientos de lodolitas grises piritosas con venas de 3cm de espesor de cuarzo. La Formación Capotes aflora a lo largo de la quebrada La Torrás. Esta zona presenta buenos afloramientos. Se registraron estrías de falla y familias de diaclasas. La roca caja principalmente lodolitas calcáreas a silíceas en algunas partes carbonosas con lentes de 25-30 cm de largo de pirita e intercalaciones de yeso y fosfatos azules entre las laminaciones. Hidrotermalmente se evidenció la presencia de venas de cuarzo piramidal, brechas hidrotermales, fallas tipo gouge y plegamientos a escala de afloramiento (Figura 7).

En la Ruta 2 se exploró la Formación Umir representada por lodolitas negras y grises micáceas, oxidadas, diaclasadas y compactas, con intercalaciones de lodolitas carbonosas.

Bajando la quebrada López se logra apreciar lodolitas negras y arcillolitas rojizas, esta última en especial encaja venas de cuarzo prismático, carbonatos de color café en venas que se abren y cierran cada 30-40. Quebrada abajo se aprecian brechas hidrotermales principalmente con cuarzo, venas de calcita, caolinita y oxi-hidróxidos de hierro hasta llegar a las estaciones E9S-1, E9S-2 y E9S-3 en donde aflora la Formación Capotes de nuevo presentando lodolitas negras y lodolitas carbonosas silíceas, en esta zona hay un sistema de venas hidrotermales de 7-15 cm de espesor, las cuales toman una coloración verdosa. En la parte NW de La Torrás (E11S en adelante) subiendo topográficamente hay venas de calcita y dolomita entre lodolitas negras silíceas, cercano a E15S se encuentra la bocamina derrumbada del tunel Santa Teresa.

Figura 7.

Fotografías de afloramientos resaltando características estructurales



Nota: Fotografía: a). Pliegue tipo chevron. b, j, k y m). Zona de falla con estrías en lodolitas calcáreas y silíceas. c, i, o). Estrías de falla con escalones. d) Pliegue sinforme. e) contacto fallado. f, g, h, l, n). Diaclasamiento, venas hidrotermales.

6.2 Análisis estructural

Para el análisis estructural se utilizaron los datos de fallas y pitch recolectados en campo, en donde se evidencian tres tendencias en las estructuras cuyos promedios de rumbo y buzamiento se muestran en la Tabla 2.

El esquema de la Figura 8 se digitalizo siguiendo los datos de σ_1 y σ_3 que dio como resultado el procesamiento en el software para definir estas tres tendencias que se dividieron en tres grupos según su cinemática.

Como se puede apreciar en la Figura 8 se tiene el resultado del análisis de diedros rectos para el conjunto de datos de fallas hecho en el software Faultkin. La tabla de datos se puede ver en el Apéndice C. Se interpreta una posible solución para el tensor del área de estudio en la distribución de ejes para estos tensores que muestra los esfuerzos σ_1 y σ_2 proyectados sobre la horizontal y el esfuerzo σ_3 proyectado casi en la vertical, definiendo una zona de cizalla donde predomina las fallas inversas. El rumbo de σ_1 o esfuerzo compresional máximo va en una dirección NW-SE, casi perpendicular a los rumbos de las fallas del grupo 1 que corresponden a las estaciones de la Ruta 1: E9 a la E26 y de la Ruta 2: E8S a E9S (zona central del área de estudio) con buzamientos de 65 grados en promedio, los datos de esta estructura se midieron a lo largo del trazo de la Falla de Guadualito que atraviesa longitudinalmente la quebrada La Torrás la componente principal de movimiento del grupo 1 es inversa y la complementaria es dextral. Para el grupo 2 y 3 se determinaron fallas con componente principal de rumbo sinistral y dextral que corresponden

a los datos de las estaciones E2-2 a E8 y E1S a E6S-2 con buzamientos 50 y 70 grados respectivamente (apéndice C), y componente inversa secundaria. La T y la P representan los diedros que están en extensión y compresión respectivamente. En la Tabla 2 se pueden ver los rumbos y buzamientos de las fallas para cada grupo.

Tabla 2.

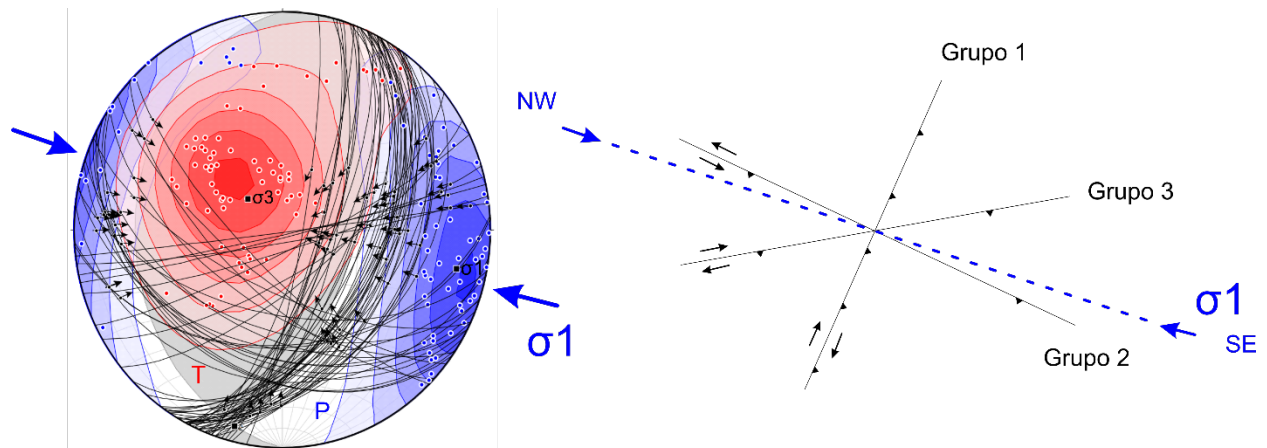
Promedio de rumbo y buzamiento para las fallas de cada grupo

Promedio	Rumbo	Buzamiento
Grupo 1	23	63
Grupo 2	120	49
Grupo 3	83	68

Una posible dirección de emplazamiento de paleofluidos podría ser paralela a la dirección de σ_3 , pero esto no se pudo corroborar con evidencias en campo debido a la falta de datos de rumbo y buzamiento de venas y tampoco se tiene certeza de su continuidad a profundidad, por lo que se plantea como hipótesis.

Figura 8.

Esquema del cálculo tensorial.



Nota: Las flechas, la línea en azul representa la dirección de σ_1 , perpendicular a este entrando y saliendo de la pantalla se encuentra σ_3 , los contornos en azul representan el diedro en compresión (P) y los contornos en rojo representan el diedro en extensión (T).

Los análisis de σ_1 , σ_2 y σ_3 son muy útiles para definir relaciones con las estructuras existentes en el área, sin embargo, no es un método perfecto y requiere de una mayor cantidad de información y datos para poder hablar de tendencias regionales, por el momento se plantea la hipótesis de que estas direcciones al menos representan el tensor local para el área de trabajo. En la tabla 3 se aprecia el trend y el plunge para cada uno de estos sigmas.

Tabla 3.

Datos de las direcciones principales de esfuerzo

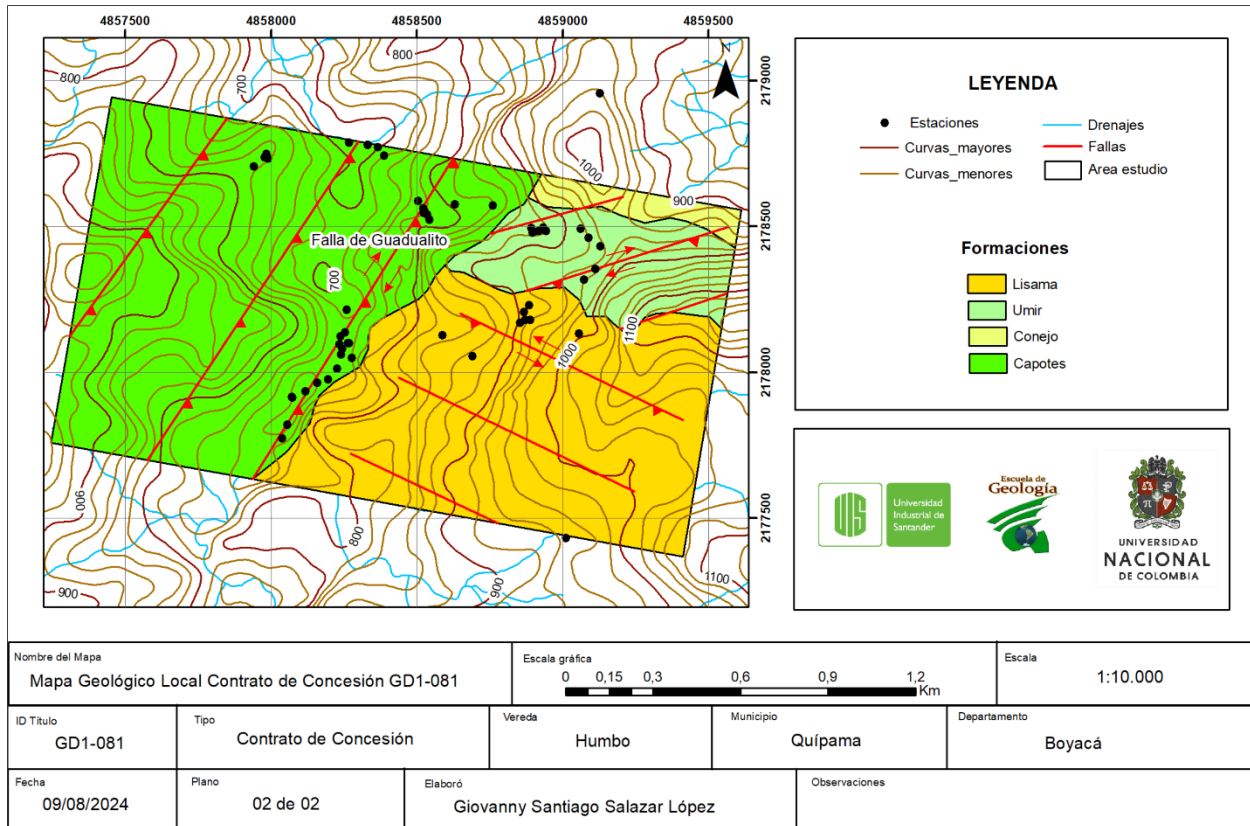
Sigma (σ)	Trend	Plunge
σ_1	102	15,6
σ_2	194,3	8
σ_3	310,7	72,4

Para la realización del mapa geológico local (Figura 9) se utiliza la información obtenida del análisis estructural y se ubican las estructuras con rumbo y cinemática de acuerdo con las estaciones correspondientes donde se tiene certeza de su trazo, las otras se dejan como lineamientos (que podrían tener una tendencia similar o no) para no subestimar los afloramientos que puede haber en las zonas donde no se hizo estación o no se tomaron datos estructurales. La única falla con nombre en la bibliografía es la Falla de Guadualito, los análisis hechos concuerdan con INGEOMINAS, (2006, p. 31), donde mencionan que corresponde a un cabalgamiento con vergencia al W. Esta falla tiene rumbo perpendicular a σ_1 en una zona donde se forman estructuras

de compresión (Figura 8).

Figura 9.

Mapa geológico local



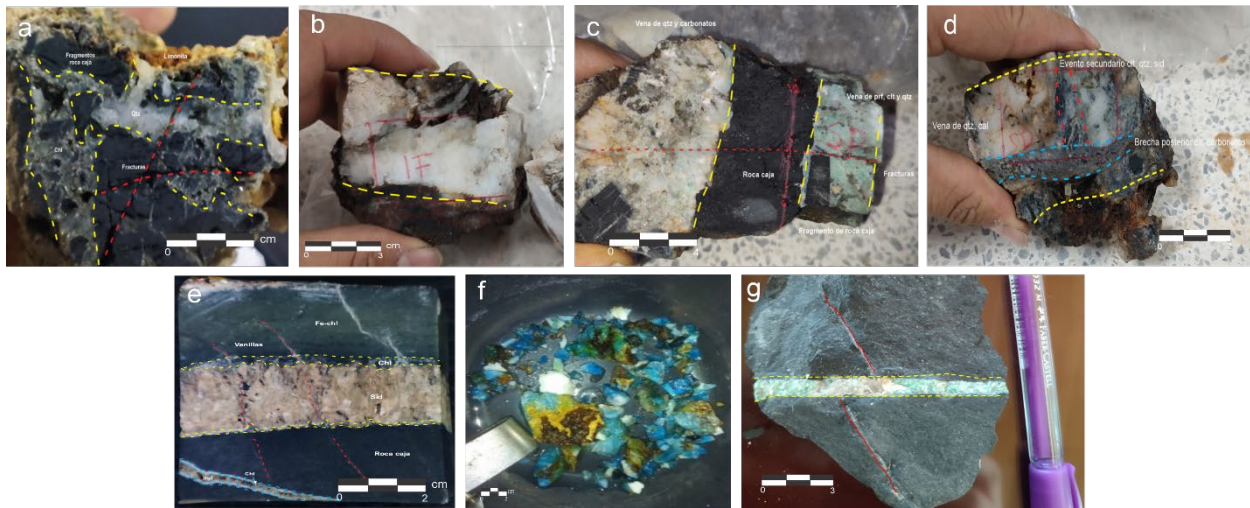
Este mapa proporciona información importante de la mecánica deformacional existente en el área de investigación, al menos para los recorridos hechos. El control principal lo lleva la falla de Guadualito inversa dextral y perpendicular a σ_1 .

6.3 Muestreo

El muestreo se relaciona con las estaciones y los análisis de laboratorio como muestra la Tabla 4, así mismo en la Figura 10 se aprecian las muestras a partir de las cuales se desarrollaron las secciones delgadas.

Figura 10.

Testigos de las secciones delgadas



Nota: a). sección E4-1, b). sección E6S-1, c). sección E9S-1, d). sección E7-1, e). sección E2-1, f). sección E0-3, g). sección E0-6.

Tabla 4.

Relación de estaciones, muestras y técnicas realizadas

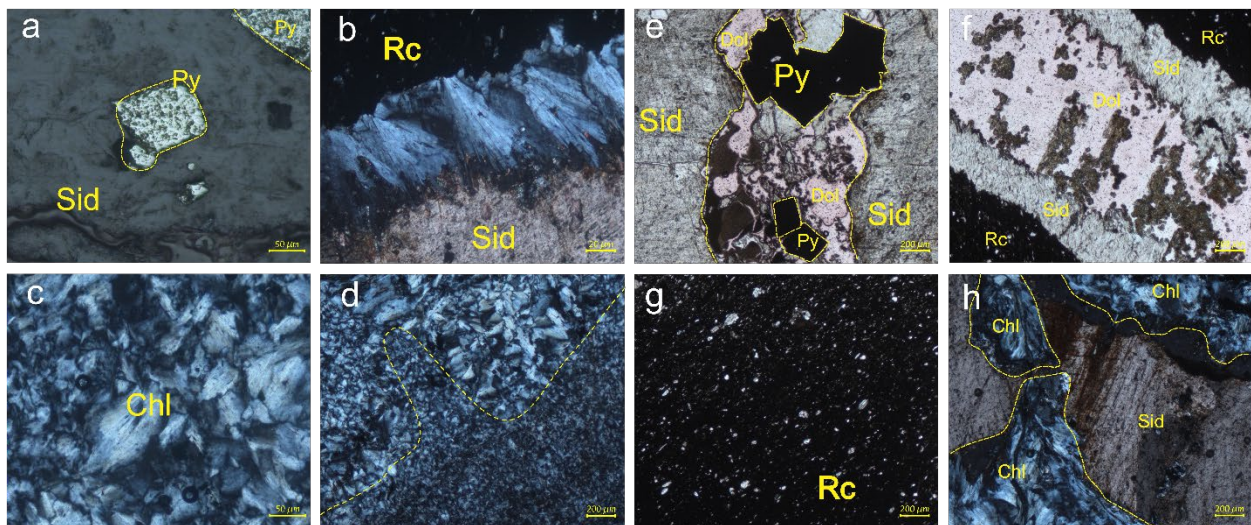
Código	Obtenido de	Muestreo	Seccion Delgada	SEM	DRX	Raman	FRX	IF
E0-1	Muestra de morraya con calcita del tunel Santa Teresa	x			x	x	x	x
E0-2	Morrayas de menor tamaño del tunel Santa Teres	x						
E0-3	Material amorfo del tunel Santa Rita	x	x	x	x	x	x	
E0-4	Material amorfo menos cristalino del tunel Santa Rita	x					x	
E0-5	Muestra de parisisita del tunel Santa Teresa	x				x		
E0-6	Muestra de Fuchcita del Tunel Santa Teresa	x	x		x		x	
E1	Formación Lisama							
E2	Formación Lisama	x	x		x			
E3	Formación Lisama	x			x		x	
E4	Formación Lisama	x	x		x	x	x	
E5	Formación Lisama	x			x			
E6	Formación Lisama	x			x			
E7	Formación Lisama	x	x					
E8	Formación Lisama	x			x			
E9	Formación Capotes	x			x		x	
E10	Formación Capotes	x			x			
E11	Formación Capotes							
E12	Formación Capotes	x						
E13	Formación Capotes							
E14	Formación Capotes	x						
E15	Formación Capotes							
E16	Formación Capotes	x						
E17	Formación Capotes	x						
E18	Formación Capotes							
E19	Formación Capotes	x						
E20	Formación Capotes	x						
E21	Formación Capotes	x						
E22	Formación Capotes							
E23	Formación Capotes	x						
E24	Formación Capotes							
E25	Formación Capotes							
E26	Formación Capotes	x			x		x	
E1S	Formación Umir	x						
E2S	Formación Umir				x			
E3S	Formación Umir	x						
E4S	Formación Umir						x	
E5S	Formación Umir	x			x	x	x	
E6S	Formación Umir	x	x					
E7S	Formación Capotes	x						
E8S	Formación Capotes	x						
E9S	Formación Capotes	x	x		x	x	x	
E10S	Formación Capotes							
E11S	Formación Capotes	x						
E12S	Formación Capotes	x						
E13S	Formación Capotes							
E14S	Formación Capotes	x						
E15S	Formación Capotes	x						

6.4 Petrografía

Para cada sección se utilizan abreviaciones en las figuras para indicar el nombre del mineral, estas abreviaciones corresponden a: pirita (py), roca caja (rc), siderita (sid), clorita (chl), dolomita (dol), cuarzo (qtz), calcita (cal), malaquita (mch), azurita (az), óxidos (ox), pirofilita (prf), fuchsita (fu).

Figura 11.

Sección Delgada E2-1



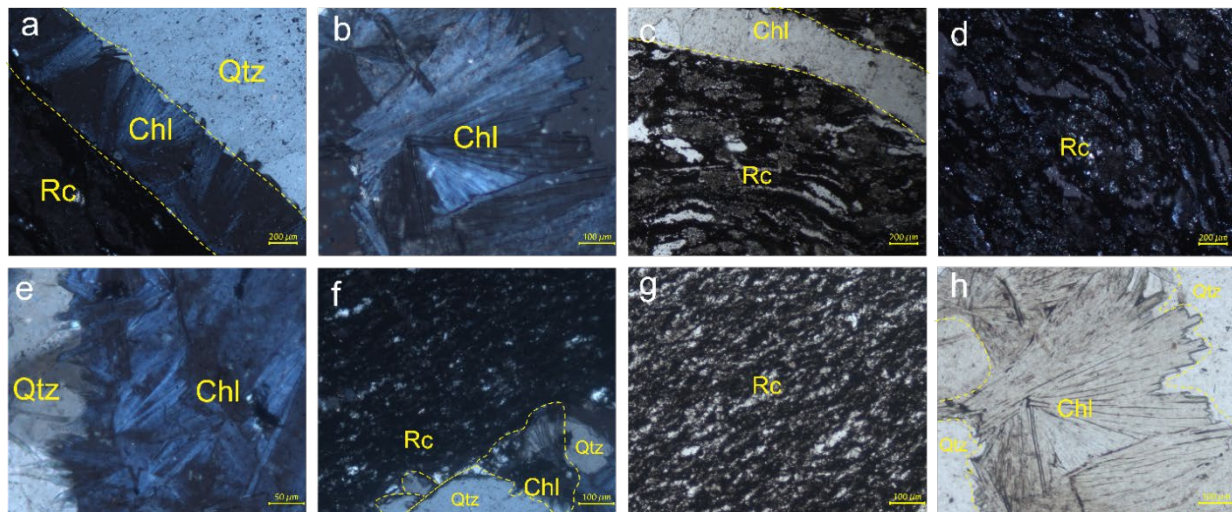
Nota: a). py hidrotermal. b). rc, sid, chl. c). chl. d). chl. e). sid, py, dol. f). rc, sid, dol. g). rc con clastos de qtz y plagioclasa. h). cristales ehuedrales de sid, envueltos por chl hidrotermal.

Para la sección E2-1: se aplicó un método de tinción con ferricianuro de potasio para diferenciar el tipo de carbonato el de coloración más roja es dolomita, el de coloración marrón es siderita (Figura 11e). La roca caja es una lodolita negra con cuarzo, feldespatos y otros accesorios, con fracturas evidentes. El mineral principal es clorita representada por cristales aciculares y

tabulares (200-300 μm) en tonos grises, amarillentos y azul oscuro, siderita con grandes cristales (>3000 μm), con tonos cafés, exfoliación romboédrica, calcita (800 μm) euhedral, dolomita masiva y pirita cubica (50 μm). Ocurre una reprecipitación de clorita lo que ocasiona un fuerte cambio textural entre estas (Figura 11d). Tiene forma fibrosa (10-40 μm de largo) y la misma birrefringencia que la clorita inicial. Este nuevo relleno empuja y arrastra fragmentos de la clorita inicial cortando en algunas partes la siderita, como accesorios presenta pequeños cristales alargados de titanita (130 μm de largo).

Figura 12.

Sección Delgada E4-1



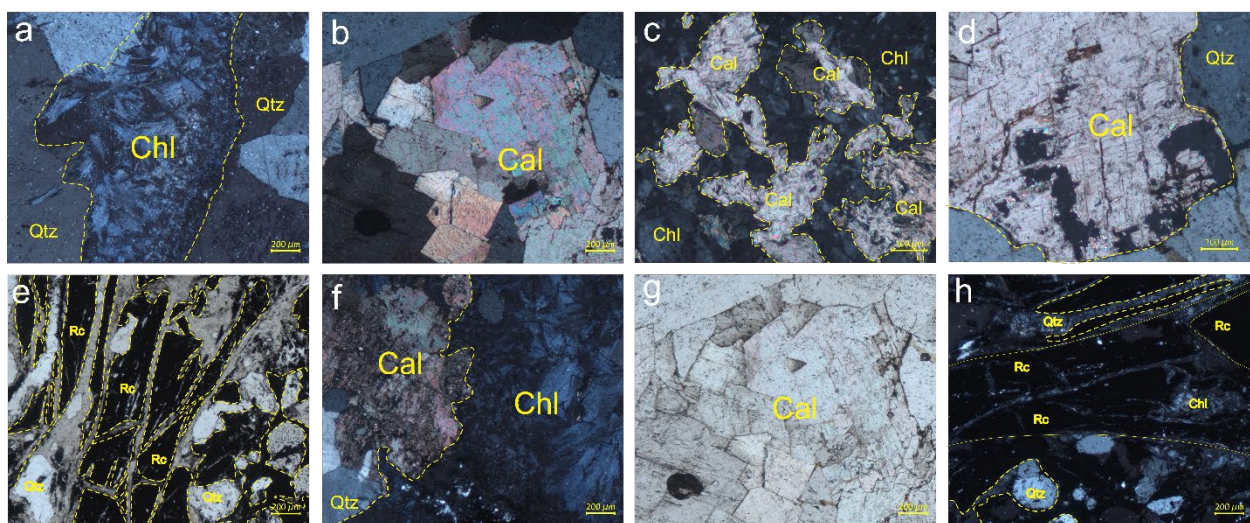
Nota: a). (rc), (chl), (qtz). b). (chl). c). (rc), (chl). d). (rc). e). (chl), (qtz). f). (rc), (chl), (qtz). g). (rc). h). (chl), (qtz).

Para la sección E4-1: se tiene una brecha hidrotermal, con presencia principalmente de cuarzo (1000 μm) euhedral, prismático, con bajos colores de interferencia y clorita (1000 μm)

euhedral, con formas tabulares y radiales, color de interferencia azul Berlín, relieve moderadamente alto (Figura 12). Los fragmentos de roca caja evidencian procesos de alteración, pero también se aprecian clastos de casi 200 μm lo que la define como una lodolita arenosa. Como accesorio se presentan micas (10 μm).

Figura 13.

Sección Delgada E7-1

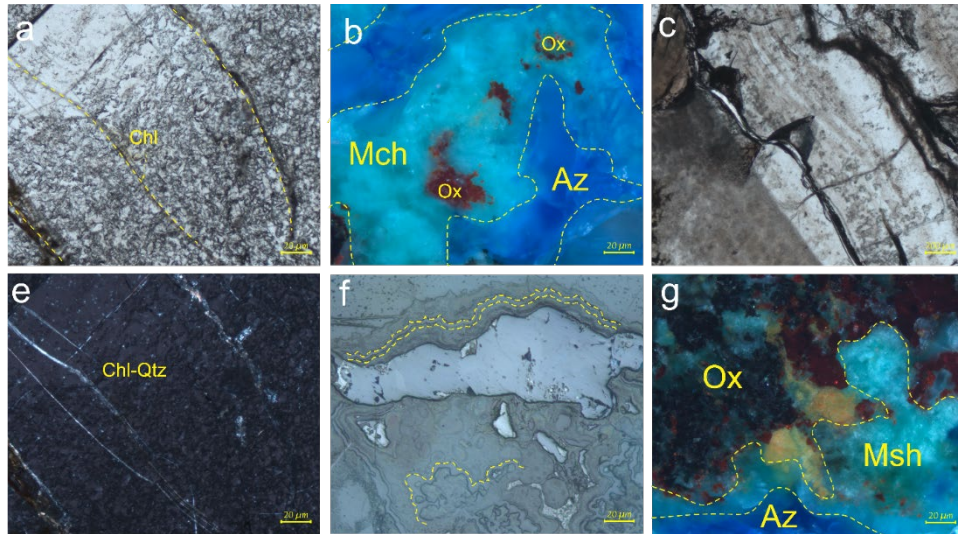


Nota: a). (chl), (qtz). b). (cal). c). (cal), (chl). d). (qtz), (cal). e). (rc), (qtz). f). (cal), (chl). g). (cal). h). (rc), (qtz), (chl).

La sección delgada E7-1: proviene de un fragmento de brecha hidrotermal (Figura 10d), en donde se observa cuarzo (2000 μm), calcita (1000 μm), clorita color azul Berlín euhedral tabular a fibrosa con tamaños variables (200-400 μm), en venillas de (600 μm) que se cierran poco a poco cortando el cuarzo en paragénesis con pequeños fragmentos de carbonatos de hierro (20 μm), cuarzo fracturado (50 μm) y fragmentos de roca caja con alto contenido de opacos (Figura 13).

Figura 14.

Sección Delgada E0-3

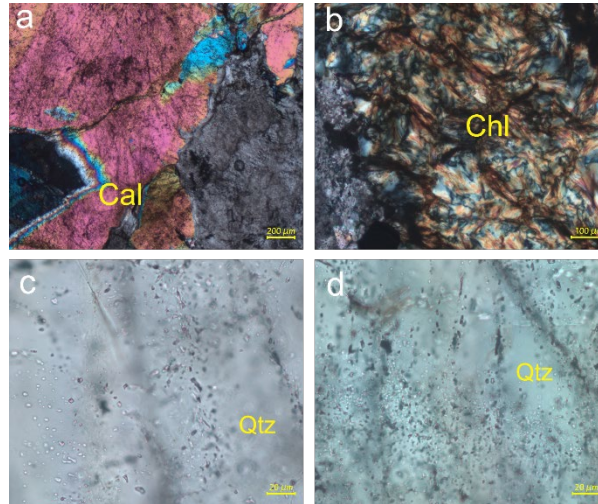


Nota: a). (chl). b). (mch), (az), (ox). c). material amorfo. e). (chl), (qtz). f). opacos en luz reflejada. g). (mch), (az), (ox).

Sección Delgada E0-3: el material amorfo se ve translucido en paralelos, con alto relieve, en nicols cruzados, presenta un color oscuro y esta atravesado por venillas de cuarzo y clorita de pocas micras de espesor, está en contacto con azurita, malaquita (300 µm) y caolinita, estos carbonatos de cobre se presentan en bandeamientos con textura colorme, con alteración supérgena presentada por óxidos de hierro. La roca caja presenta arcillas y carbonatos (Figura 14).

Figura 15.

Sección Delgada E6S-1

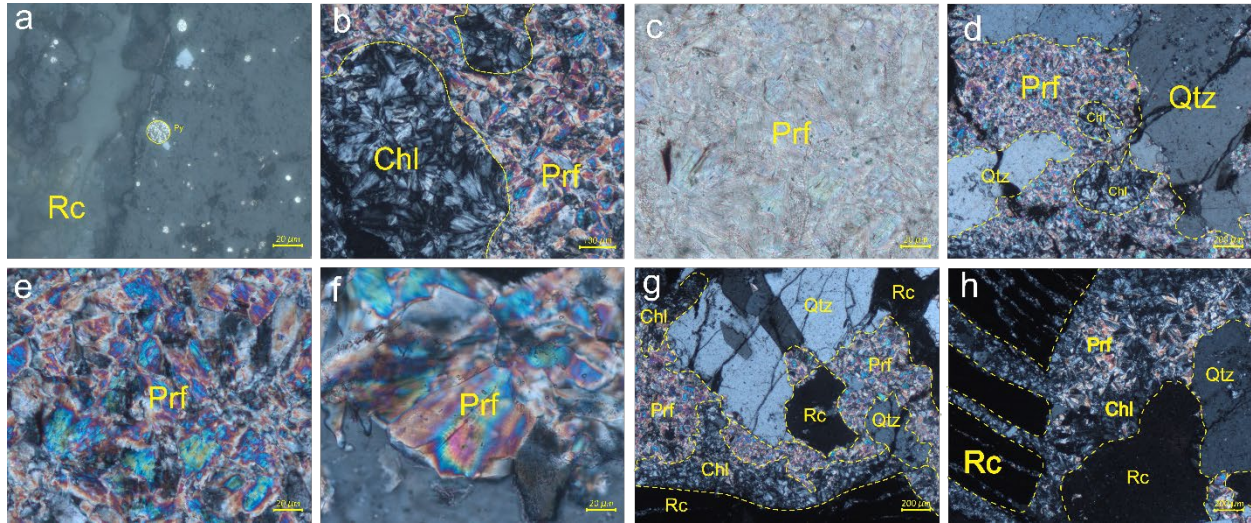


Nota: a). (cal). b). (chl). c-d). (qtz).

Sección delgada E6S-1: hace parte de una vena de calcita y cuarzo (Figura 10b), se muestra asociada con siderita (200 μm), clorita (200 μm), En algunos cristales euhedrales de cuarzo (2000 μm) se observan inclusiones bifásicas principalmente, pseudosecundarias a secundarias, con formas circulares, alargadas y cuadradas (Figura 15).

Figura 16.

Sección Delgada E9S-1

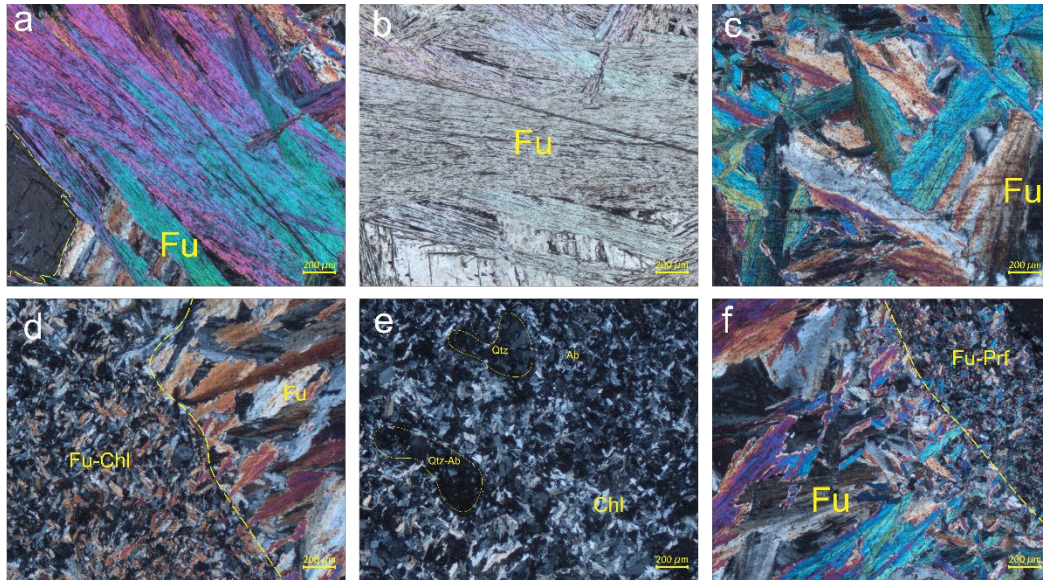


Nota: a). (rc) con pirita framboidal. b). (chl), (prf). c-f). (prf), (qtz). g-h). (rc), (chl), (qtz), (prf).

Sección delgada E9s-1: grandes cristales de cuarzo subhedral (1000 μm), pirofilita tabular (100 μm) con colores de interferencia altos y clorita (100 μm) en tonos grisáceos y oscuros, dentro de algunos cristales de cuarzo se puede apreciar acumulados de menor tamaño de pirofilita. La roca caja corresponde a una arcillolita silícea con alto contenido de materia orgánica la cual se presenta fracturada y penetrada por este hidrotermalismo micáceo (Figura 16).

Figura 17.

Sección Delgada E0-6



Nota: a-c). (fu). d). (fu), (chl). e). (chl), (qtz), (ab). f). (fu), (prf).

Sección delgada E0-6: grandes cristales de fuchsite (2000 µm), euhedrales con forma tabular alargada y radial, con colores de birrefringencia altos. Cambios texturales entre cristales de fuchsite, se encuentra en paragénesis con clorita hacia una parte y pirofilita (50-100µm). Presencia de bolsas de 400 µm de cuarzo junto con cristales circundantes de albita (Figura 17).

6.5 Resultados de las técnicas analíticas cualitativas

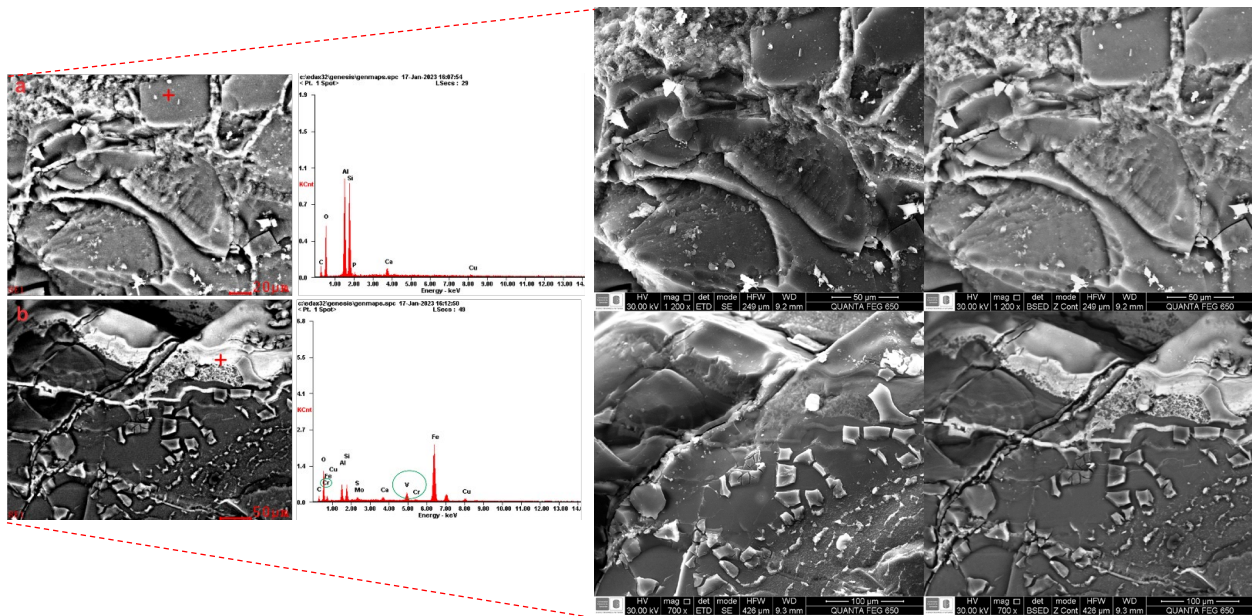
6.5.1 SEM

Se llevaron a cabo cuatro puntos de análisis para SEM, en la Figura 18 se aprecia a la derecha imágenes de electrones secundarios y a la derecha imágenes de electrones

retrodispersados, morfológicamente se describe el material como una sustancia de dos fases diferenciada por agregados de tipo poliédrico-tabular que puede ser producto de “cristalización” o de fractura, del bandeamiento coloforme se muestra similar a lo visto en la sección E0-3 (Figura 14), que representa una asociación mineral de carbonatos de cobre (azurita y malaquita), justo en este punto, se realiza medición dando contenido de Cr y V.

Figura 18.

Fotografías BSE, SE y espectros del análisis semicuantitativo



En la Figura 18 se pueden observar los puntos donde se lleva a cabo la adquisición y el espectro semicuantitativo que da una noción inicial de la posible composición de este material y poderlo diferenciar de la roca caja y los carbonatos con los que se encuentra en paragénesis, el cual este análisis sugiere que es un aluminosilicato de hierro y calcio (Tabla 5).

Tabla 5.

Valores semicuantitativos para los seis puntos realizados.

Elemento	Porcentaje en peso (Wt%)					
	E0-3	E0-3	E0-3	E0-3	E0-3	E0-3
C	14.69	18.82	12.1	15.14	6.29	12.91
O	42.1	38.6	28.81	39.69	8.17	43.62
Al	19.5	17.7	7.69	11.94	4.2	18.52
Si	21.68	21.79	6.63	29.97	3.96	22.68
P	0.53	0.7	-	0.55	-	0.44
Ca	0.9	1.55	0.92	2.01	1.26	1.83
Cu	0.61	0.84	2.65	-	7.62	-
S	-	-	0.75	-	0.68	-
K	-	-	-	-	0.32	-
V	-	-	3.28	-	3.19	-
Cr	-	-	0.17	-	-	-
Mn	-	-	-	-	0.26	-
Fe	-	-	36.32	0.7	64.05	-

Nota: La estación es la misma en todas las columnas porque es el mismo mineral evaluado en diferentes puntos.

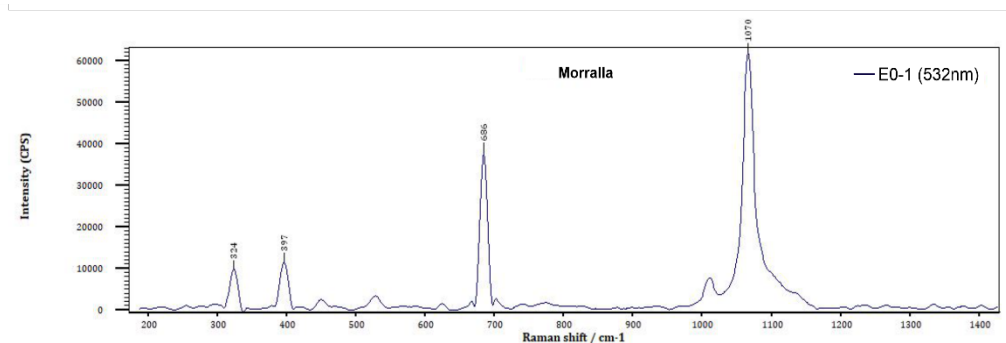
6.5.2 Espectroscopia Micro-Raman

Se observan espectros obtenidos para minerales de las muestras de morralla E0-1, pirofilita E9S-1, parisita E0-5, calcita E4-1 y el material amorfo E0-3. los estudios espectroscópicos son una técnica ampliamente utilizada para la comprobación, clasificación y diferenciación de la estructura interna de los minerales procesos ocurridos en la de los minerales. Para este análisis se realizaron 8 análisis microespectrométricos (Apéndice F) de los cuales se muestran los espectros resultantes más representativos. Al momento en que los enlaces atómicos se someten a esta radiación vibran a cierta frecuencia y dan como resultado las señales de radiación raman que forman al espectro. El espectro se muestra en una gráfica con dos ejes en el eje Y la intensidad en conteos por segundo y en el eje X la dispersión Raman representada con el número de onda (cm-1). Esta variable muestra la relación directa entre la energía y la frecuencia de los modos vibracionales de los enlaces atómicos que conforman a los minerales. Al realizar el proceso de radiación con el láser ocurre también un fenómeno de fotoluminiscencia que se divide en fluorescencia y fosforescencia como

respuesta a la excitación de los electrones a un nivel superior y su posterior decaimiento. Este fenómeno ocurre en nanosegundos (ns) y genera un ruido de fondo que podría alterar la correcta interpretación del resultado del espectro.

Figura 19.

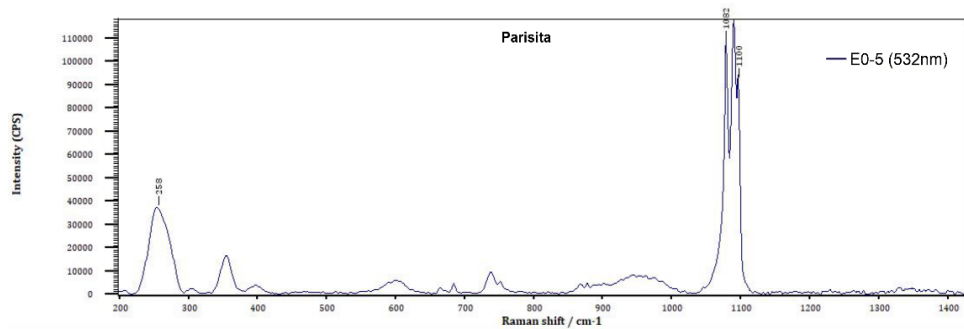
Espectrograma para morralla de la muestra E0-1.



Para el primer mineral analizado (Figura 19), se tomó la muestra E0-1 se obtuvo picos en 324, 397, 686, 1070 cm^{-1} , la muestra estaba orientada según el eje cristalográfico c siendo el pico de intensidad máximo 1070 cm^{-1} . comparándolo con otros estudios: En Karampelas et al. (2019) realizaron Raman a 532 nm y obteniendo picos característicos en 686 y 1069 cm^{-1} , las bandas relacionadas con vibraciones del Si-O están ubicadas por debajo de los 600 cm^{-1} , las bandas de 686 y 1070 cm^{-1} corresponden a las vibraciones del berilio. Romero et al. (2021) también muestra ese pico. Se realizó otro espectro para otra esmeralda el cual mostró otro pico en 1233 cm^{-1} esto se podría deber al CO_2 atrapado en inclusiones fluidas.

Figura 20.

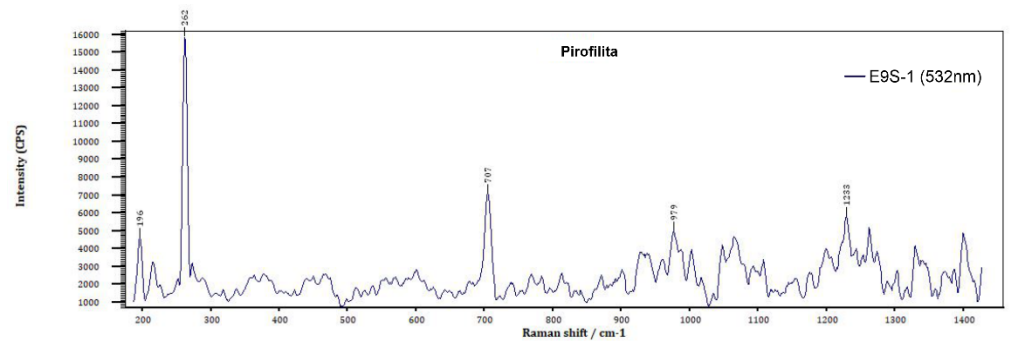
Espectrograma para parisita de la muestra E0-5.



El espectro de la parisita (Figura 20) orientada según el eje cristalográfico c muestra picos en 258, 350, 1082, 1093 y 1100 cm^{-1} . Los tres picos seguidos de 1082 a 1100 son los característicos de este mineral. Zeug et al. (2021) utilizó laser de 633 nm puesto que el resto provocaba fluorescencia que daña la adquisición de la señal, los picos que obtuvo son 1081, 1092 y 1099 modos vibracionales del CO_3 que representan rango de estiramiento simétrico, no tienen en cuenta los picos por debajo de 400 cm^{-1} . Esto podría indicar diferencias en la composición química del cristal. Estas bandas sirven para diferenciar fluorcarbonatos. Al aumentar el ancho de banda se pueden interpretar estas fases de fluorcarbonato. Con este resultado se comprueba la presencia de parisita no solo como mineral indicador sino paragenético con las morrallas del túnel Santa Teresa.

Figura 21.

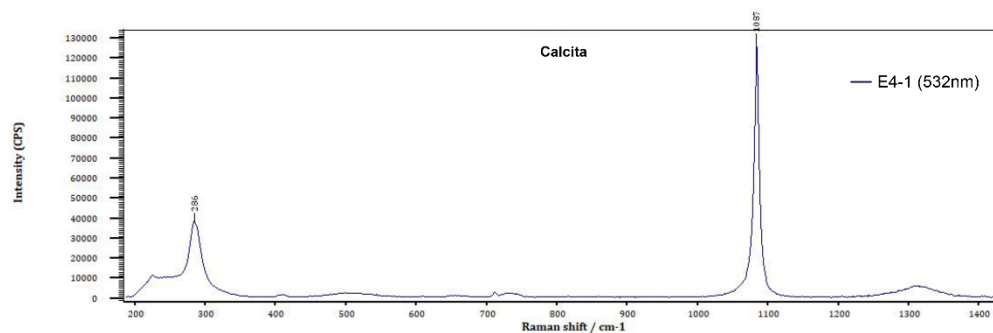
Espectrograma para pirofilita de la estación E9S-1



La pirofilita (Figura 21), se encuentra masiva por lo que no se tiene certeza de en qué dirección de los ejes cristalográficos. Sin embargo, muestra picos característicos en 196, 262, 707. Se observa bastante ruido en el espectro principalmente porque está en asociación con la clorita y el cuarzo, aunque también por la fluorescencia que genera las moléculas. Arbiol et al. (2021), expone estos picos característicos obtenidos con láser 633 nm.

Figura 22.

Espectrograma para calcita de la estación E4-1.

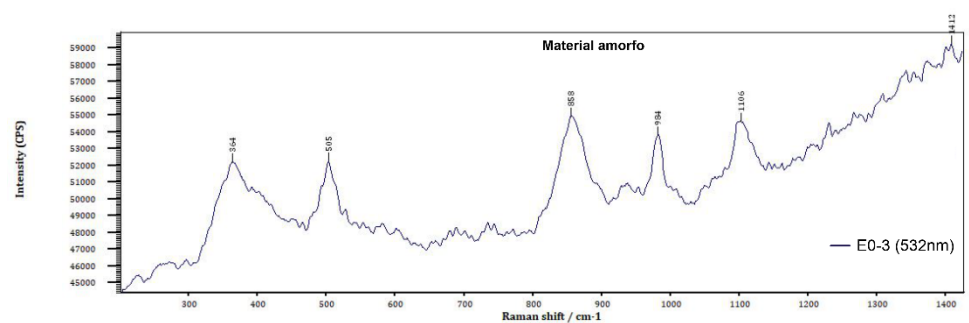


Los picos de los carbonatos analizados para el espectro de la Figura 22 corresponden a 286 y 1087 cm-1. Farsang et al. (2018) muestra picos para la calcita en 284, 713, 1088 cm-1 y para la

siderita en 183, 284, 731 y 1085 cm⁻¹. El largo ancho de banda de la dispersión en el pico 286 puede deberse a impurezas de hierro en el carbonato.

Figura 23.

Espectrograma para calcita de la muestra E0-3



El espectro de la Figura 23 se realizó para la muestra amorfa E0-3, es probable que la medición se haya visto alterada por el hecho de usar el láser de 532nm en vez de usar uno en de mayor longitud de onda (azul). Sin embargo, se puede analizar una curva de crecimiento característica que presentan algunos minerales arcillosos. Aun así, esta información no fue suficiente para clasificar este material.

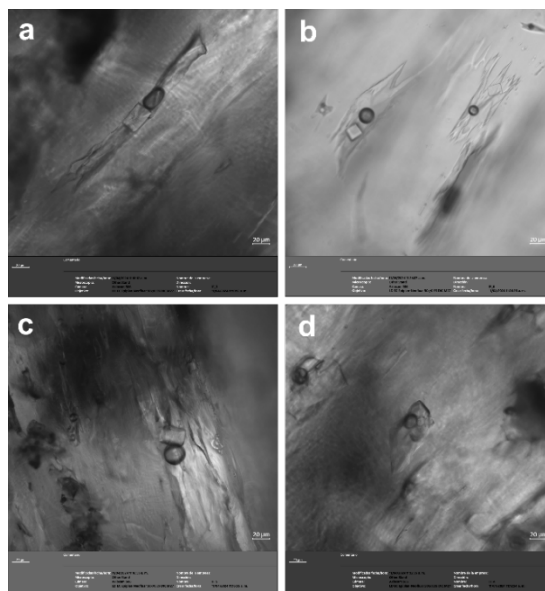
6.5.3 Inclusiones Fluidas (IF)

Se realizaron fotografías microscópicas detallados de las morrallas de la muestra E0-1, que revelaron la existencia de inclusiones fluidas (IF) trifásicas y polifásicas a temperatura ambiente cuyas dimensiones varían de pocas micras a más de 0,3mm, presentando morfologías con contornos regulares a aserrados o irregulares. En repetidas ocasiones con características que sugieren haber sufrido modificaciones posteriores a su aprisionamiento, tales como escape de fluidos y estrangulamiento. Poseen orientaciones paralelas, perpendiculares o inclinadas respecto

al eje cristalográfico c del mineral (Figura 24). En oportunidades se muestran en grupos aislados o presentes a lo largo de las líneas de crecimiento del cristal huésped (IF primarias) o presentándose en una distribución plana a lo largo de fracturas (IF secundarias y pseudosecundarias).

Figura 24.

Inclusiones fluidas morralla muestra E0-1.



Las IF estudiadas según Romero (1998) están compuestas por cantidades variables de salmueras, $\text{CO}_2(\text{l})$, $\text{CO}_2(\text{g})$ doble anillo en la burbuja de gas, pudiendo contener una o más fases sólidas, que en la mayoría de las ocasiones representan minerales de saturación. De manera general poseen proporciones volumétricas de una solución acuosa salina: 75% $\text{CO}_2(\text{g})$, menos del 3% de $\text{CO}_2(\text{l})$ y entre 10 y 20% de minerales de saturación representados por halita, silvita, y carbonatos que pueden ser calcita y dolomita. La presencia de inclusiones fluidas trifásicas y con formas dentadas o aserradas en las esmeraldas, es una de las características principales de las esmeraldas colombianas para ambos cinturones.

6.6 Resultados de las técnicas analíticas cuantitativas

6.6.1 DRX realizados en la Universidad Industrial de Santander

Muestra E0-1: Morralla extraída del túnel Santa Teresa, en paragénesis con cuarzo y calcita.

Muestra E2-1: Esta muestra se relaciona con la sección E2-1, vena de chamosita casi en un 89%. La chamosita $[(Fe^{2+})_5Al(Si,Al)_4O_{10}(OH,O)_8]$ es una clorita con dominio composicional de hierro, asociado con Birnessita potásica este mineral representa alteraciones supérgenas contiene manganeso y anatasa el polimorfo del rutilo.

Muestra E9S-1: Vena de pirofilita principalmente relacionada con la sección E9s-1 coloración verdosa, asociada con cuarzo, chamosita y minerales arcillosos.

Muestra E5S-1: Vena de siderita con calcita y en menor medida clinocloro que es una clorita con dominio composicional de magnesio.

Muestra E0-6: Moscovita rica en Cr con albita, fluorapatito, dolomita y siderita, presencia de albitización.

El resumen de este análisis se puede ver en la Tabla 6. Estas muestras son representativas para asociaciones de la zona mineralizada.

Tabla 6.

Tabla cuantitativa principales muestras minerales.

CÓDIGO DE LABORATORIO		CÓDIGO DE CAMPO
24-0203		(E0-1)
NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	CUANTITATIVO
Berilo	$Be_2Al_2(Si_6O_{18})$	46.34%
Calcita	$Ca(CO_3)$	28.80%
Silicato de Cromo Aluminio y Berilio	$Al_{1.8}Cr_{0.2}Be_3Si_6O_{18}$	23.52%
Cuarzo	SiO_2	1.34%
24-0204		(E2-1)
NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	CUANTITATIVO
Chamosita-1Mllb	$(Mg_{5.036}Fe_{4.964}Al_2.724)(Si_{15.70}Al_{2.30})O_{20}(OH)_{16}$	88.72%
Birnessita Potásica	$K_{0.5}Mn_2O_{4.3}(H_2O)_{0.5}$	7.99%
Anatasa	TiO_2	3.29%
24-0205		(E9S-1)
NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	CUANTITATIVO
Pirofilita	$(Al_4Si_6O_{20}(OH)_4)_{0.3333}$	66.49%
Cuarzo	SiO_2	11.88%
Chamosita-1Mllb	$(Mg_{5.036}Fe_{4.964}Al_2.724)(Si_{15.70}Al_{2.30})O_{20}(OH)_{16}$	8.63%
Gibbsita	$Al(OH)_3$	6.78%
Caolinita-1A	$Al_2(Si_2O_5(OH)_4)$	3.32%
Óxido de Litio Níquel Cobalto y Manganeso	$Li(Ni_{0.2}Co_{0.8}Mn_{0.2})O_2$	2.90%
24-0206		(E5S-1)
NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	CUANTITATIVO
Siderita	$Fe(CO_3)$	62.92%
Calcita	$Ca(CO_3)$	16.61%
Cuarzo	SiO_2	9.57%
Birnessita Potásica	$K_{0.5}Mn_2O_{4.3}(H_2O)_{0.5}$	6.31%
Clinocloro	$(Mg_{11.148}Fe_{0.852})(Si_{14.99}Al_{3.01})O_{20}(OH)_{16}$	4.59%
24-0025		(E0-6)
NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA	CUANTITATIVO
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	-
Albita	$(Na_{0.98}Ca_{0.02})(Al_{1.02}Si_{2.98}O_6)$	-
Fluorapatita	$Ca_5(PO_4)_3F$	-
Moscovita-2M1 con Cromo	$(K_{0.959}Ba_{0.012}Na_{0.029})(Al_{1.825}Ti_{0.033}Fe_{0.110}Cr_{0.108}Mg_{0.110}Mn_{0.0009})(Si_{3.155}Al_{0.855}O_{10})(O_{0.502}F_{0.041}Cl_{0.001}(OH)_{1.456})$	-
Moscovita-2M1	$(K_{0.94}Na_{0.04})(Al_{1.88}Fe_{0.12}Mg_{0.07}Ti_{0.03})(Si_{3.01}Al_{0.99}O_{10.11})(OH)_{1.85}F_{0.04}$	-
Siderita	$FeCO_3$	-

6.6.2 DRX realizados en la Universidad Nacional de Colombia:

Muestra E2-2: Principalmente materia orgánica, fases de cuarzo y clinocloro. La roca caja lodolita arenosa fina

Muestra E9S-1, E9S-2 y E9S-3: Pirofilita, cuarzo y clinocloro.

Muestra E11 Pirita con cuarzo, derivado de las lodolitas negras y grises, con alto porcentaje de materia orgánica.

Muestra E5: Se aplicó corrección de fondo (background subtracted) y filtro de Fourier (smooth) los cuales suavizan un poco la señal en pro de diferenciar la información principal. Presencia de cuarzo, siderita, clorita, calcita y hematita.

Muestra E10: Yeso y cuarzo.

Muestra E3: Cuarzo, goethita, clinocloro y dickita.

Muestra E6: Carbón, dolomita, cuarzo, con fases no muy claras de clorita.

Muestra E0-1: Berilio, cuarzo y calcita.

Muestra E2S: Materia orgánica, no hay claridad en el espectro fases dudosas de moscovita, cuarzo, fengita.

Muestra E4: Cuarzo, clinocloro, siderita y calcita.

Muestra E5S-1: Cuarzo, clinocloro y birnessita.

Muestra E5S-2: Cuarzo y clinocloro.

Muestra E9: Pirofilita, clorita, cuarzo, yeso.

Muestra E26: Roca caja carente de venas, fases de pirita, cuarzo, pirofilita y presencia de óxidos de Fe-Mg.

Muestra E0-3: Espectro amorfo, no muestra ningún pico característico.

Muestra E2-1: Clinocloro, cuarzo y siderita.

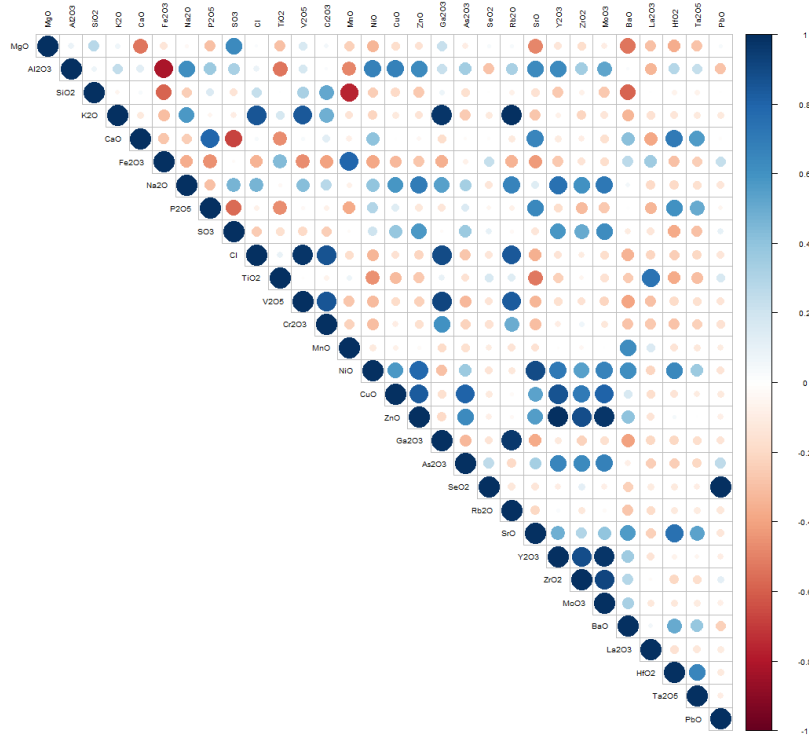
Hay una ligera diferencia entre las bases de datos de ambos laboratorios, principalmente la del laboratorio de Guatiguará diferencia las fases de clorita distinguiendo mejor entre clinocloro y chamosita. Los espectros de este análisis se pueden ver en el apéndice D.

6.6.3 FRX

El análisis de Fluorescencia busca confirmar si existe o no relación entre las variables que corresponden a óxidos para elementos mayores y menores tanto para venas (14 muestras) como para rocas caja (3 muestras). La tabla está disponible en el apéndice F y la estación correspondiente en la metodología.

Figura 25.

Correlación de Pearson (r) para venas.



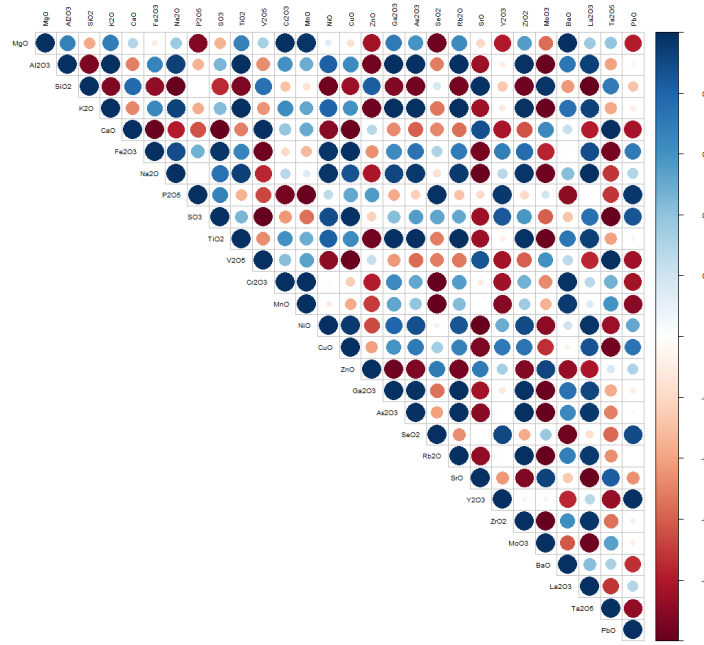
Para la Figura 25 las variables que se correlacionan positivamente: Cl-Ti, V-K, Cl-V, Cl-Cr, Mn-Fe, Ga-K, Ga-V, Rb-K, Sr-Ni, Y-Zn, Y-Cu, Zr-Zn, Mo-Zn, Pb-Se. Cl-Ti, Cl-V-Cr, Cl-Cr, esto puede estar relacionado con los fluidos salinos que funcionaron como ligandos para transportar el Be y los cromóforos. V-K, Ga-K, Rb-K, Ga-V indica un posible incremento de estos

elementos por presencia de micas. Es de resaltar la relación en metales: Sr-Ni, Zr-Zn, Mo-Zn y de la tierra rara: Y-Zn, Y-Cu, dada en la muestra de material amorfo, Borzenko y Yugerson (2020) explican la tendencia de una mayor concentración de lantánidos pesados en cristales de berilo. LA relacion Mn-Fe y Pb-Se se explica por la presencia de carbonatos de hierro en las estaciones E5S.

Las variables que se correlacionan negativamente: Al-Fe y Mn-Si característico por la presencia de siderita y óxidos de hierro y menor presencia de aluminosilicatos. S-Ca a mayor piritita hidrotermal en el sistema menor presencia de calcita.

Figura 26.

Correlación de Pearson (r) para roca caja.

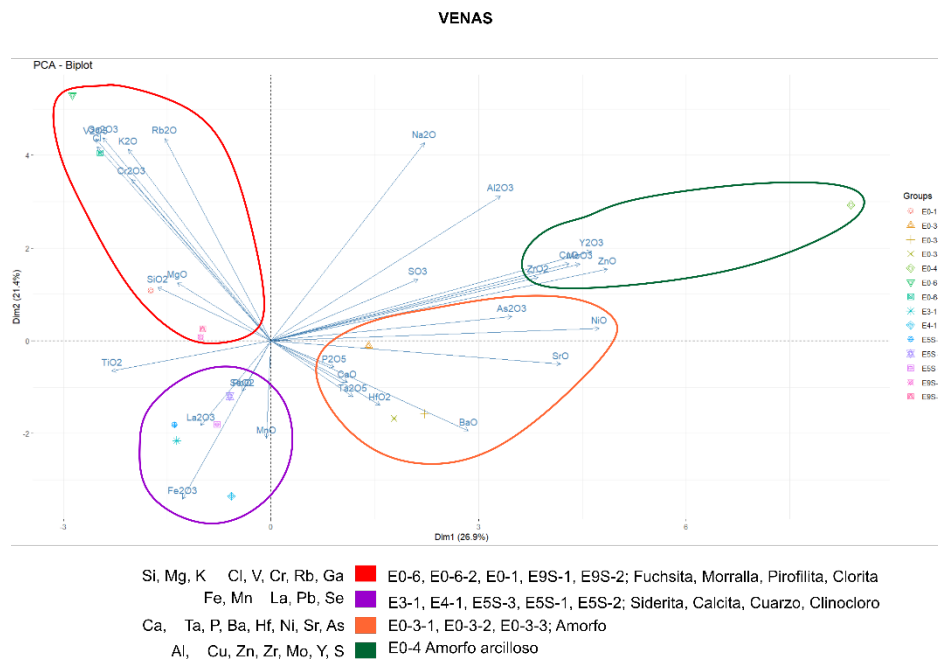


Los resultados de la correlación para las muestras de roca caja (Figura 26), muestran una alta densidad de “relaciones”, pero no representan tendencias reales debido a la falta de mayor cantidad de datos, sin embargo, analizando el gráfico se deduce que presentan más correlaciones

negativas que positivas. En general su distribución es homogénea y constante, no se pueden extraer tendencias y por lo tanto interpretaciones de la composición de la roca caja más que la presencia dominante de Al, Si, K, Ca y Fe. El V y Cr están por debajo de 1000 ppms a diferencia del análisis de venas donde se mostraron valores de hasta 1%.

Figura 27.

Análisis de componente principal para roca venas.



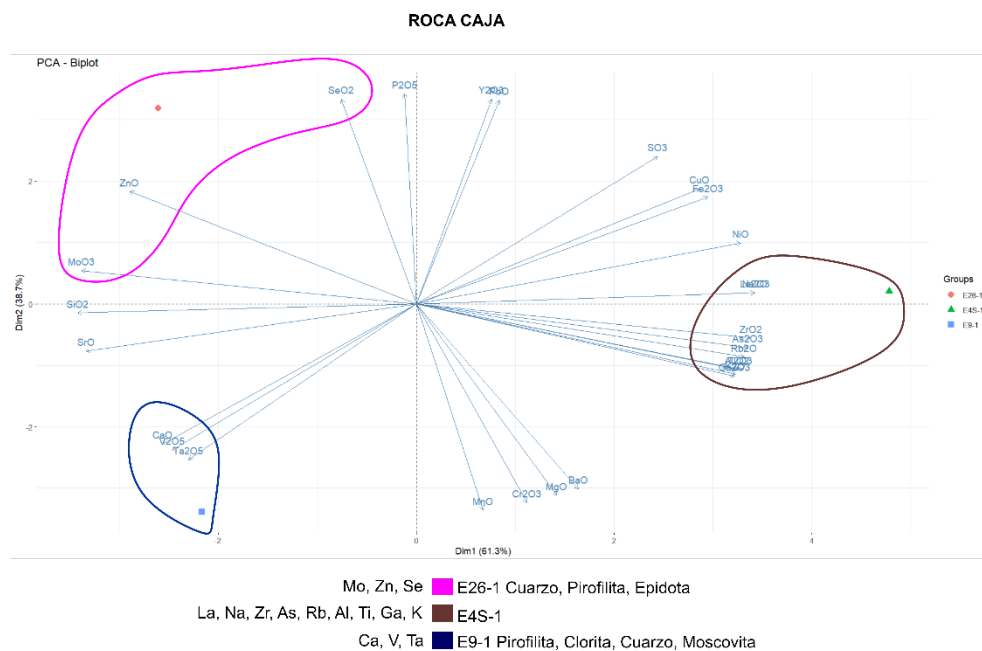
Nota: Las relaciones de las venas con los elementos se pueden ver directamente en la parte de abajo del grafico se correlacionan en grupos por colores y las estaciones se aprecian en la parte derecha.

De las relaciones vistas en la Figura 27, para cada grupo de estaciones la que más destaca es la del grupo rojo puesto que es donde se ubican las venas de micas y la esmeralda. El V, Cr, K,

Rb, Ga y Cl tienden a crecer con la presencia de fuchcita, de acuerdo con los análisis hechos de correlación de Pearson, esto indica un enriquecimiento previo en V y metales para el sistema, incluso más que la esmeralda para la cual tiende con mayor fuerza hacia el Si y el Mg. La pirofilita se encuentra en zona de transición por el Ti y el La. En el grupo morado se observa más homogeneidad en cuanto a la distribución de las muestras en el diagrama tendiendo hacia Fe y Mg dado por los carbonatos. El grupo naranja y verde marcan una tendencia distinta para las muestras del material amorfo, cuando este se encuentra masivo como “arcilla” tiende a tener altos contenidos de Cu, Zn, Zr e Y, también concorde con el análisis de correlación. Cuando este material se encuentra con estructura mas definida tiende a contener mas Ni, Ba, Sr, Ca y Hf.

Figura 28.

Análisis de componente principal para roca caja.



Nota: Las relaciones de la roca caja con los elementos se pueden ver directamente en la parte de abajo del grafico se relacionan en grupos por colores. colores y las estaciones se aprecian en la parte derecha.

En la Figura 28 se interpreta la roca caja de la muestra E26 en el grupo de color morado asocia Mo, Zn y Se, esta se extrajo de la parte SW del título correspondiendo a lodolita gris silicea. Para E4S-1 el grupo de color marrón asociación Na, Li, Zr, As, Rb, entre otros, se extrajo en el trayecto por la quebrada López en donde hay intercalaciones de arcillolitas y lodolitas negras, el sodio mayor al 1% puede indicar una leve albitización, cercano a esta estación se encuentran las venas con alta densidad de carbonatos de hierro y dolomita. Y para la muestra E9-1 asocia Ca, V y Ta, en donde se encuentran lodolitas calcáreas. El sistema se encuentra empobrecido en cromóforos para todas las estaciones.

7. Discusión

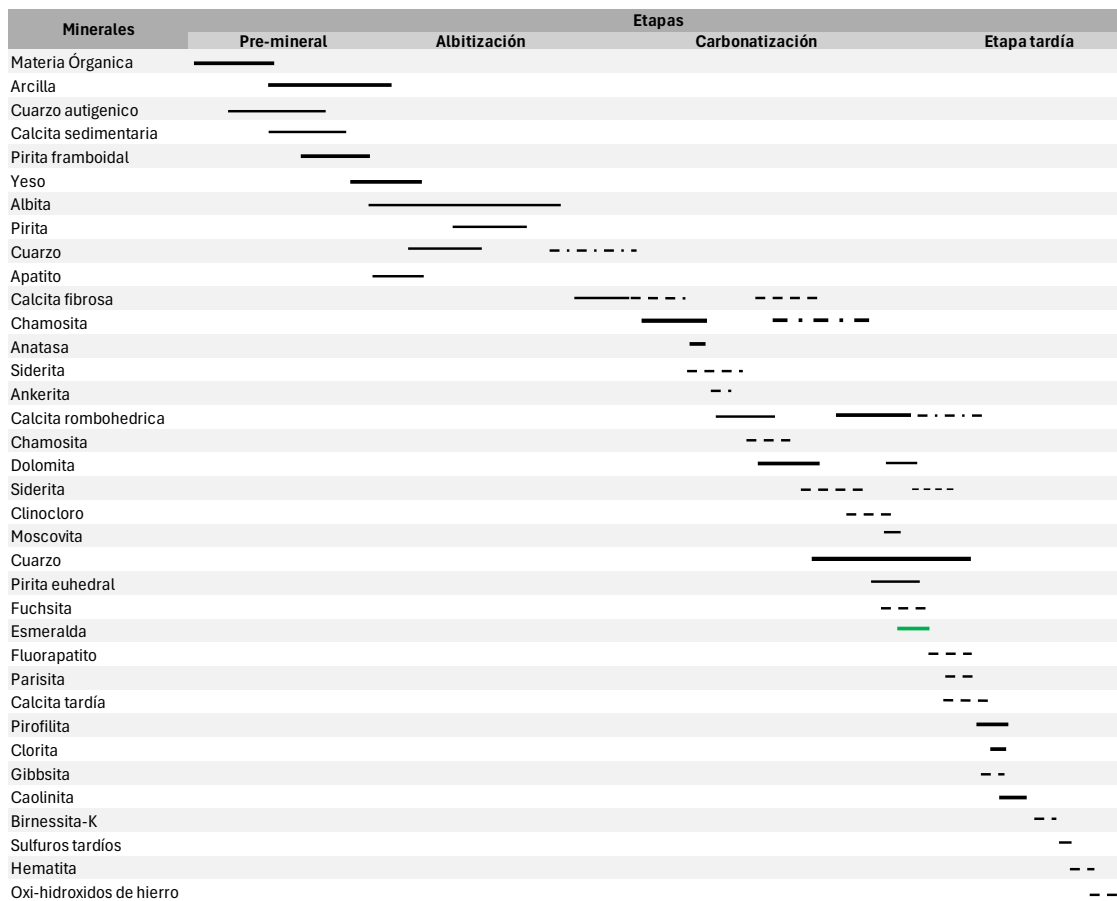
Para el desarrollo de las etapas mineralizantes y la paragénesis de la esmeralda Garcia et al. (2023a), menciona que la mineralización está ligada a una secuencia particular con cuatro etapas, premineral: alteración de la roca caja, albitización: albita, micas, calcita fibrosa, entre otras. Mineralizante: presencia de carbonatización: calcita romboédrica, dolomita, micas y sulfuros, esta etapa está relacionada con la cristalización de la esmeralda y la etapa tardía: euclasa, baritina, calcita posterior, yeso, pirofilita, fluorapatita y minerales supergénicos. Se toma esta información como referencia y se modifica según las observaciones de campo y los análisis realizados como se muestra en la Figura 29.

Meza, (2007) menciona la paragénesis de mineralización como calcita-dolomita-albita-pirita para el túnel La Paz en Coscuez.

Martín, (2020) sugiere carbonatos como la dolomita, fluorcarbonatos y fluorita, en paragénesis con la esmeralda para el área de Cunas. Estas relaciones se podrían asociar con la presencia de parisita vista en el túnel Santa Teresa de donde también se extrajeron las morrallas.

Figura 29.

Etapas minerales y paragénesis de la esmeralda.



Nota: En color verde se muestra la zona de precipitación de la esmeralda.

La paragénesis puede variar mucho dentro del mismo sitio, porque generalmente la esmeralda se observa asociada a venas de carbonatos, con contenidos variables de cuarzo, pirita y en algunas partes fluorita y fluorcarbonatos que pueden estar enriquecidos en REE, los cuales funcionan como un excelente indicador.

Del punto de vista estructural, queda la incógnita de la posible apertura ocasionada por σ_3 es sincrónico con la depositación y la dirección del flujo de los paleofluidos hidrotermales que formaron las venas y brechas analizadas o no y está relacionado con otro evento u otro paleoesfuerzo, para saber eso hay que tomar más medidas estructurales en campo de fallas y venas.

8. Conclusiones

Petrográficamente el análisis de las muestras y secciones delgadas permitió inferir que la serie de cloritas (chamosita, clinocloro) corresponden a un mismo evento hidrotermal regional el cual evolucionó desde la Formación Umir a Lisama como una diferenciación de Mg a Fe hacia el final de su emplazamiento, los datos de difracción para las venas en la Formación Lisama desde E2-1 corresponde a chamosita y en La Formación Umir aparece el clinocloro asociado a siderita en la muestra E5S-1. Otra hipótesis que se puede plantear es que la clorita varía dependiendo de la disponibilidad de Fe y Mg que tenga de acuerdo con la roca caja donde se emplaza el fluido. Para comprobar esto hay que realizar geocronología con los eventos hidrotermales.

La pirofilita y la fuchcita hacen parte de un fluido más evolucionado y enriquecido en vanadio emplazadas en venas hidrotermales de la Formación Capotes, en la paragénesis se define como previo a la mineralización de esmeraldas, sin embargo, Garcia et al. (2023a), menciona la posibilidad de cristalizar estas micas por enriquecimientos tardíos del sistema.

Geoquímicamente la unión de los datos de fluorescencias con las difracciones de las venas para las estaciones E4, E0-3, E5S, E9S, E0-1 y E0-6 complementa la mineralogía vista y la roca caja para las estaciones E9-1, E26-1 y E4S-1 se muestran homogéneas en cuanto al contenido de óxidos mayores, pero en elementos menores presentan variaciones interesantes entre las que destaca la anomalía de itrio y otros elementos para las muestras de material amorfo, las REE marcan tendencias como pathfinders dentro de las minas de esmeralda (Martín, 2020).

Una de las asociaciones geoquímicas más interesantes se evidencia en el grupo de las micas verdes la fuchsita presenta mayor concentración de vanadio que la morralla, pero no de cromo. La pirofilita también presenta enriquecimiento en vanadio, pero no tanto como la fuchsita. Analizando los datos espacialmente ambas muestras se extrajeron de la Formación Capotes y se encuentran cerca del túnel Santa Teresa con ocurrencias de morralla con dolomita, calcita, cuarzo y parisita. Sin embargo, para definir esto como yacimiento falta mucha más investigación y exploración, por el momento resultan ocurrencias minerales. La parisita y los fluorcarbonatos son excelentes indicadores, dan buenas expectativas para seguir explorando esta área.

La unión de datos de petrografía, difracciones, espectroscopia, raman y fluorescencia corrobora la mineralogía vista y descrita para la zona y se puede relacionar espacialmente junto con los datos estructurales.

Retomando las preguntas de investigación planteadas al inicio: La mineralogía de las venas que tienen como Formación encajante la Formación Lisama: están dadas por clorita tipo clinocloro y chamosita, siderita, dolomita y calcita, para el hidrotermalismo de la Formación Capotes: micas tipo fuchsita, pirofilita y clorita, cuarzo. hacia la zona del túnel Santa Teresa se analizó la paragénesis de la ocurrencia de esmeralda, que va acompañada de fluorcarbonatos, cuarzo, parisita y calcita. Como accesorio presenta fuchsita y micas verdes. Para las venas encajadas en la

Formación Umir se tiene siderita, calcita y cuarzo. La tendencia de las estructuras se explicó con el desarrollo de un tensor de esfuerzos local en el cual va NW-SE (Figura 8) con valores de trend y plunge 102 y 15.6 (Tabla 3) respectivamente. La dirección de la mínima compresión (σ_3) dió casi vertical con valores de tren y plunge de 310.7 y 72.4 (Tabla 3). Así mismo gracias a estos análisis se pudo realizar el mapa geológico local con las estructuras vistas en campo y cinemáticas (Figura 9).

El desarrollo de eventos hidrotermales se explica con la Figura 29 pero en total son 4 etapas de evolución del fluido para que mineralice esmeralda de acuerdo con la información recolectada y la bibliografía. El ejemplo más local que se tiene para comparar estas mineralizaciones es el de González et al. (2021) en el que asocia minerales que, si están presentes en el área como fluorcarbonatos dolomita, calcita, anatasa, albita, entre otros.

La mejor área para continuar prospectando se halla en donde queda ubicado el túnel Santa Teresa. Se plantea que los ligandos de los cromóforos y el Be fueron transportados a partir compuestos fluorurados y clorurados dadas las relaciones vistas en los análisis de fluorescencias (Figura 25 y 27).

9. Recomendaciones

Se recomienda realizar técnicas de análisis elemental como ICP-MS en las diferentes venas de carbonatos, clorita, micas verdes y sobre todo las presentes en el área del Túnel Santa Teresa, para corroborar las fases cristalinas identificadas y poder diferenciar o datar eventos.

Se recomienda hacer un levantamiento de columna estratigráfica a lo largo de la quebrada La Torrás, incluso en áreas fuera del título hacia el norte donde es bastante probable que aflore el

contacto entre la Formación Muzo y la Formación Capotes y se encuentren nuevas evidencias que soporten o refuten el modelo paragenético planteado.

Se sugiere continuar con el análisis haciendo el estudio de microtermometría para la sección delgada doblemente pulida correspondiente a la muestra E6S definiendo variables importantes como temperatura, composición, salinidad, etc. Es un buen punto de partida para seguir realizando avances.

Referencias Bibliográficas

- Angelier, J., & Mechler, P. (1977). Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisables en tectonique et en seismologie : la methode des diedres droits. Bulletin de La Societe Geologique de France, S7-XIX(6), 1309–1318. doi:10.2113/gssgfbull.s7-xix.6.1309.
- Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slips data sets. Journal of Geophysical Research, 89(B7), 5835. doi:10.1029/JB089iB07p05835
- Arbiol, C., Layne, GD., (2021). Raman Spectroscopy Coupled with Reflectance Spectroscopy as a Tool for the Characterization of Key Hydrothermal Alteration Minerals in Epithermal Au–Ag Systems: Utility and Implications for Mineral Exploration. Applied Spectroscopy. Vol 75, 12.
- Banks, D., Giuliani, G., Yardley, B., & others. (2000). Emerald mineralisation in Colombia: Fluid chemistry and the role of brine mixing. Mineralium Deposita, 35, 699–713. <https://doi.org/10.1007/s001260050273>
- Borzenko, A., Yurgenson, G. (2020). Scandium, Yttrium and Lanthanids in the Beryl of the Sherlovaya Gora Deposit. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, 37-42. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49468-1_5
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Coblold, P., Baby, P., Laumonier, B., y Giuliani, G. (1999a). Andean transpressive tectonics at the eastern edge of the Cordillera Oriental, Colombia (Chivor-Guavio area). Fourth ISAG, (04), 103-105.

- Branquet, Y., Laumonier, B., Cheilletz, A. y Giuliani, G. (1999b). Emeralds In The Eastern Cordillera Of Colombia: Two Tectonic Settings For One Mineralization. *Geology*. Vol 27, 597-600. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027)
- Cheilletz, A., Giuliani, G. (1996). The genesis of Colombian emeralds: a restatement. *Mineral. Deposita* 31, 359–364 <https://doi.org/10.1007/BF00189183>
- Cheilletz, A., Feraud, G., Giuliani, G., & Rodriguez, 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. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.2.361>
- Davis, George. (2011). *Structural geology of rocks and regions*. John Wiley and Sons.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2016). *Indicador de importancia económica municipal*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/indicador-de-importancia-economica-municipal>
- Farsang, S., Facq, S., Redfern, S., (2018). Raman modes of carbonate minerals as pressure and temperature gauges up to 6 GPa and 500 °C. *American Mineralogist*, vol. 103, no. 12.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- Giuliani, G., Cheilletz, A., Arboleda, C., Carrillo, V., Rueda, F., & Baker, J. H. (1995). An evaporitic origin of the parent brines of Colombian emeralds: Fluid inclusion and sulphur isotope evidence. *European Journal of Mineralogy*, 7(1), 151–165. <https://doi.org/10.1127/ejm/7/1/0151>

- Garcia-Toloza, J., Holman, A., Carlos, C., Betancur, C., (2023a). Fingerprint differences between Emeralds from two main zones of production in Colombia in response to input from their host rock. 37 th IGC 2023.
- Garcia-Toloza, J., Ramírez-Juya, V., Betancur, C., Gonzalez, V., Angarita, G., Alvarado, H., (2023b). Chromium and vanadium from host rock to emerald: tracing differences between the two main emerald zones in Colombia and their gemological implication.
- González, A.F., García, J., Bonilla, G., Cedeño, C.J., Angarita, L.G., Castañeda, A.J., Parra, S.D., Bocanegra, L.C., Montaña, J. y López, C.L., (2021). Geoquímica y mineralogía de la mina La Pava, Muzo-Quípama: implicaciones en la exploración de esmeraldas en Colombia. Boletín de Geología, 43(2), 117-142. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n2-2021007>
- Hay escasez de esmeraldas, ¿qué está pasando? (2023, 17 de marzo). Revista Semana. <https://www.semana.com/economia/macroeconomia/articulo/hay-escasez-de-esmeraldas-que-esta-pasando/202314/>
- Horton, B.K. Parra, M. y Mora, A. (2020). Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. En: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (Eds.) The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 67–88. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>
- Instituto Colombiano De Geología Y Minería. (2006). Geología Del Cinturón Esmeraldífero Occidental Planchas 169, 170, 189 Y 190. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010002777/documento/pdf/2105027771101000.pdf>
- Instituto Colombiano De Geología Y Minería. (2000). Mapa Geológico del Departamento de

Boyacá.

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040020044/documento/pdf/0101200441101000.pdf>

Karampelas, S., Al-Shaybani, B., Mohamed, F., Sangsawong, S., Al-Alawi, A. (2019). Emeralds from the Most Important Occurrences: Chemical and Spectroscopic Data. *Minerals*, Vol. 9, 561. <https://doi.org/10.3390/min9090561>

Marjoribanks, R (24 de diciembre de 2015). Sense of movement structures in fault zones - Part 1, Theory. <https://rogermarjoribanks.info/sense-movement-structures-part-1-theory/>

Martín, A. (2020). Caracterización mineralógica y espectral de las rocas del cinturón esmeraldífero occidental (Formaciones Furatena y Muzo) y su relación con la Formación Paja del Valle Medio del Magdalena. Implicaciones en la mineralización de esmeraldas en Cunas (Maripí, Boyacá). Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia.

Meza, A. (2007). Estudio de las manifestaciones hidrotermales del Tunel La Paz, Vereda Coscuez San Pablo de Borbur Boyacá. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander.

Ortega, L. (2007). Tipología y Condiciones de Formación de las Manifestaciones Hidrotermales del Sector Peña Coscuez, San Pablo de Borbur, Boyacá. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Repositorio Institucional – Universidad Industrial de Santander.

Peña, E. (2007). Caracterización y Significado del Cloritoide en Rocas Cretácicas de la Cordillera Oriental del Sector Muzo-Quipama. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander.

- Plata, L. (2007). Genesis de las Venas Hidrotermales en Rocas Sedimentarias de la Formación Rosablanca. Mina El Trapiche, Peñas Blancas San Pablo de Borbur, Boyacá. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander.
- Romero, F. (1998). Esmeraldas colombianas: mineralogía, geología e gènesis. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. (tesis de maestría). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Sánchez, J., Tesón, E., Horton, B., Mora, A., Ketcham, R., Stockli, D., Moreno, N. (2011). Influence of the Eastern Cordillera Exhumation on the Structural Evolution of the Eastern Part of Middle Magdalena Valley Basin, Colombia [Diapositiva de PowerPoint]. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/290392668_Influence_of_the_Eastern_Cordillera_Exhumation_on_the_Structural_Evolution_of_the_Eastern_Part_of_Middle_Magdalena_Valley_Basin_Colombia
- Secretaria de Turismo, Gobernación de Boyacá. (s.f.). Municipio de Quípama.
<https://situr.boyaca.gov.co/municipio-de-quipama/>
- Servicio Geológico Colombiano. (2011). Las Esmeraldas De Colombia En Su Ámbito Geológico.
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B13/23008010024470/Documento/PDF/2105244701101000.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano. (2008). Geología de la Plancha 189 La Palma. Recuperado el 24 de febrero de 2024.
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010023212/Mapa/Pdf/2105232121300001.pdf>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2024a). Boletín estadístico de Minas y Energía 2018-2023. <https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Paginas/Boletin-estadistico-de-ME.aspx>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2024b). Boletín estadístico informativo Mayo 2024.

<https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras->

Sectoriales/BoletinMinerales/Boletin_mineria_en_cifras_mayo_2024.pdf

Zeug, M., Nasdala, L., Ende, M., Habler, G., Hauzenberger, C., Chanmuang, C., Skoda, R., Topa,

D., Wildner, M., Wirth, R., (2021). The parisite-(Ce) enigma: challenges in the identification of fluorcarbonate minerals. *Miner Petrol* Vol. 115, 1–19.

<https://doi.org/10.1007/s00710-020-00723-x>