

Estudio petrográfico de las rocas aflorantes en la transecta de las veredas San Pedro y San Antonio, Cañón del Chicamocha (Macizo de Santander)

Andres Felipe Cabeza Orcasita

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Geólogo PhD. en geología económica y geoquímica

Codirector

Carlos Alberto García Ramírez

Geólogo PhD. en petrografía y vulcanología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías físico-químicas

Escuela de geología

Pregrado en geología

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi mamá, quien es la mujer que me lo ha dado todo en esta vida y sin su apoyo, palabras y guianza, tal vez la historia hubiera sido otra, y no estaría aquí optando por este título.

Gracias infinitas.

Agradecimientos

Culminando este proceso académico, existieron muchas personas que estuvieron presentes, apoyándome en los momentos difíciles, guiándome, intentando sacar lo mejor de mí e incluso presionándome cuando yo mismo había llegado a pensar que no lo lograría, a todas ellas quiero enviarles un fuerte abrazo porque sus pequeños empujones me impulsaron para lograr este objetivo, y si no estás aquí mencionado, y fuiste alguna de esas personas, sabrás que este agradecimiento también es para ti: A mis colegas universitarios que siempre me apoyaron, me tendieron la mano, y me acogieron en un grupo muy alegre, propositivo y colaborativo con quienes pudimos obtener diferentes logros y muchas muy buenas experiencias; A mis amigos Carlos Pinto y Edward Cantillo que han sido mis compañeros de muchas aventuras y están siempre dispuestos a escucharme y aconsejarme en momentos donde la claridad mental no está a la mano; A mis profesores de la universidad: Francisco Velandia, Angélica Alvares y Leonardo Palmera por creer en mis capacidades, y estar siempre con una buena actitud y disponibilidad para ayudarme; A los profesores Luis Carlos Mantilla y Carlos García quienes me confiaron el desarrollo del presente proyecto investigativo, el cual, sin su guía, confianza, y tiempo ofrecido para discusiones no hubiera podido realizarse; A la Universidad Industrial de Santander por facilitarme el uso de sus equipos, y financiar la preparación de secciones delgadas; así como al laboratorio de Microscopia del Parque Tecnológico Guatiguará por permitirme el uso del SEM para obtener los datos necesarios para el desarrollo del presente proyecto; a las secretarias Rosita, Martica y a Cesitar, por facilitarnos los procesos a los estudiantes; al técnico Luis Fernando Anaya por su increíble trabajo con las secciones delgadas y las enriquecedoras charlas que me brindó.

En definitiva, a todos quienes estuvieron en mi camino hasta hoy...

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	11
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos	11
2. Localización geográfica	12
3. Antecedentes	13
3.1. Marco geológico regional	13
3.2. Marco geológico local.....	18
3.2.1. Esquistos del Chicamocha	18
3.2.2 Falla de Bucaramanga.....	19
3.2.3. Falla de Lebrija	20
3.2.4. Interacción entre fallas	20
4. Metodología	21
4.1. Fase de campo.....	21
4.2. Fase de laboratorio.....	22
4.3 Interpretación y sustentación de resultados	25
5. Resultados	26
5.1. Geología del área objeto de estudio	26
5.2. Descripción macroscópica	33
5.3. Análisis petrográfico	49
5.4. Microscopia electrónica de barrido.....	63
6. Discusión.....	70
6.1. Implicaciones geológicas	78
7. Conclusiones	80
Recomendaciones	82
Referencias bibliográficas.....	83

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Principales pulsos magmáticos en el macizo de Santander</i>	16
Tabla 2. <i>Clasificación de tamaños de clastos conglomeráticos según Wentworth (1922)</i>	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Localización área objeto de estudio</i>	12
Figura 2. <i>Geología regional</i>	13
Figura 3. <i>Geología estructural regional</i>	17
Figura 4. <i>Geología local</i>	19
Figura 5. <i>Geología estructural local</i>	21
Figura 6. <i>Equipos de preparación de secciones delgadas</i>	23
Figura 7. <i>Equipos utilizados para la toma de datos</i>	25
Figura 8. <i>Afloramiento objeto de estudio</i>	27
Figura 9. <i>Textura afloramiento objeto de estudio</i>	28
Figura 10. <i>Características texturales del afloramiento</i>	29
Figura 11. <i>Afloramiento de cuarcita AND-02</i>	31
Figura 12. <i>Afloramiento cuarcita deformada AND-03</i>	32
Figura 13. <i>Depósitos por gravedad AND-04</i>	33
Figura 14. <i>Muestras de clastos</i>	34
Figura 15. <i>Distribución textural de clastos</i>	36
Figura 16. <i>Clastos con alteración</i>	37
Figura 17. <i>Clastos de cuarzo</i>	39
Figura 18. <i>Clastos de composición riolítica</i>	41
Figura 19. <i>Clasto metamórfico</i>	42
Figura 20. <i>Muestra de mano representativa del afloramiento (MTZ-01)</i>	44
Figura 21. <i>Muestra de mano del afloramiento Mtz-01 en el corte A-A'</i>	45

Figura 22. <i>Muestra de mano representativa del afloramiento (MTZ-02)</i>	46
Figura 23. <i>Vistas laterales en A-A' y B'-B de la muestra MTZ-02</i>	47
Figura 24. <i>Vista del corte C-C' de la muestra MTZ-02</i>	48
Figura 25. <i>Petrografía del clasto CLA-01</i>	50
Figura 26. <i>Petrografía del clasto CLA-12</i>	52
Figura 27. <i>Petrografía del clasto CLA-16</i>	54
Figura 28. <i>Petrografía del clasto CLA-28</i>	56
Figura 29. <i>Mosaico de microfotografías de la muestra MTZ-01</i>	58
Figura 30. <i>Mosaico de microfotografías de la muestra Mtz-02-01</i>	60
Figura 31. <i>Mosaico de microfotografías de la muestra MTZ-02-02 recuadro a</i>	61
Figura 32. <i>Microfotografía de la muestra Mtz-02-02 recuadro b</i>	62
Figura 33. <i>Aspecto de magnetitas observados al SEM en muestras de clasto (CLA-16)</i>	64
Figura 34. <i>Aspecto de granate observado al SEM en muestras de clasto (CLA-16)</i>	66
Figura 35. <i>Aspecto de magnetitas y pirita observados al SEM en muestras de clasto (CLA-17)</i>	67
Figura 36. <i>Aspecto de minerales arcillosos observados al SEM en muestras de clasto (CLA-17)</i>	68
Figura 37. <i>Aspecto de magnetitas dentro de los clastos observados al SEM en muestras de matriz (MTZ-01)</i>	69
Figura 38. <i>Relación entre matriz y clasto observados al SEM en muestra de matriz (MTZ-01)</i> ..	70
Figura 39. <i>Evolución geológica de las cataclasitas cizalladas</i>	74
Figura 40. <i>Relación de los eventos deformativos en la historia del Macizo de Santander</i>	77
Figura 41. <i>Identificación de la falla Panachi</i>	79

Resumen

Título: Estudio petrográfico de las rocas aflorantes en la transecta de las veredas San Pedro y San Antonio, Cañón del Chicamocha (Macizo de Santander)*

Autor: Andres Felipe Cabeza Orcasita**

Palabras Clave: Orogenia Famatiniana, deformación frágil, deformación dúctil, cizalla.

Descripción: El presente documento es el resultado de un trabajo de tesis de pregrado “modalidad investigación”, realizado en el sector del Cañón del Chicamocha (veredas San Pedro y San Antonio, municipio de Aratoca), Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia).

Una franja de deformación, de dirección aproximada E-W, denominada falla Panachi (por su proximidad al parque homónimo), presenta clastos, de composiciones principalmente riolíticas, metamórficas y de cuarzo hidrotermal (de tamaños promedios entre 4 y 64 mm), embebidas en una matriz de componentes más finos, los cuales se han interpretado (sobre la base de estudios macro y microscopios), como una franja de cataclasitas cizalladas.

La edad de formación de esta franja de rocas, solo ha sido posible ser determinada, mediante relaciones de temporalidad relativa. La presencia de clastos metamórficos derivados de la unidad Esquistos del Chicamocha y de las Metariolitas de Onzaga, de edades Ordovícico temprano (~480 Ma edad del metamorfismo) y Ordovícico tardío (~450 Ma), respectivamente, junto a la ausencia de rocas de fallas en su proyección lateral, hacia las litologías sedimentarias de edad Mesozoica, permite sugerir que la falla Panachi y gran parte de su historia de deformación asociada, temporalmente se relaciona con eventos de deformación del Paleozoico Tardío-Mesozoico Temprano (eventos que posiblemente pudieran ser relacionados con el desarrollo de la orogenia Aleghaniana, reconocida y documentada en la cordillera Central de Colombia); y un último evento deformativo en el intervalo temporal del Paleógeno tardío a la actualidad, relacionándolo posiblemente a los eventos orogénicos andinos que levantaron la cordillera Oriental de Colombia o a la tectónica activa.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías físico-químicas. Escuela de geología. Pregrado en geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Geólogo PhD. en geología económica y geoquímica Codirector: Carlos Alberto García Ramírez. Geólogo PhD. en petrografía y vulcanología

Abstract

Title: Petrographic study of the outcropping rocks in the transect of San Pedro and San Antonio, Chicamocha Canyon (Santander Massif)*

Author: Andres Felipe Cabeza Orcasita**

Key Words: Famatinian Orogeny, brittle deformation, ductile deformation, shear deformation.

Description: This paper is the result of an undergraduate thesis work “research mode”, carried out in the Chicamocha Canyon sector (San Pedro and San Antonio villages, municipality of Aratoca), Santander Massif (Eastern Cordillera, Colombia).

A deformation belt, of approximate E-W direction, called Panachi fault (due to its proximity to the homonymous park), presents clasts of mainly rhyolitic, metamorphic and hydrothermal quartz compositions (of average sizes between 4 and 64 mm), embedded in a matrix of finer components, which have been interpreted (based on macro and microscopic studies), as a sheared cataclasite belt.

The age of formation of this rock belt has only been possible to determine through relative temporal relationships. The presence of metamorphic clasts derived from the Chicamocha Schists unit and the Onzaga Metariolites, dating from the Early Ordovician (~480 Ma age of metamorphism) and Late Ordovician (~450 Ma), respectively, together with the absence of fault rocks in its lateral projection, towards the Mesozoic-aged sedimentary lithologies, suggests that the Panachi fault and much of its associated deformation history is temporally related to Late Paleozoic-Early Mesozoic deformation events (events that could possibly be related to the development of the Alleghanian orogeny, recognized and documented in the Central Cordillera of Colombia); and a final deformation event in the time interval from the Late Paleogene to the present, possibly related to the Andean orogenic events that raised the Eastern Cordillera of Colombia or to active tectonics.

* Degree Work

** School of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Undergraduate in geology. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Geologist PhD. in economic geology and geochemistry Co-director: Carlos Alberto García Ramírez. Geologist PhD. in petrography and volcanology

Introducción

En el cañón del Chicamocha, área en cercanías al parque nacional del Chicamocha se ha observado la presencia de estructuras E-W que pueden estar asociadas a procesos que complementen la historia geológica de la zona conocida hasta ahora, de modo que pueda ampliar la gama de datos existentes como: procesos de formación, características geomorfológicas, geocronología, litologías correlacionables, entre otros. Información que permite tener un mejor acercamiento a nuevos procesos geológicos, y, en consecuencia, encontrar sus posibles implicaciones geológicas, ofreciendo nuevos datos que enriquezcan la comprensión del territorio y su historia geológica a escalas locales.

De manera actualizada, la información sobre nuevos procesos a escala local en áreas aledañas se limita al trabajo realizado por Reynozo & Turizo (2024) sobre los metaconglomerados ubicados en la Quebrada La Tinta y la Quebrada Los Totumos donde describen su textura, composición, proveniencia y edad relativa. Sin embargo, pesar de sus contribuciones, los datos actuales aun no permiten ofrecer una visión completa y precisa de dichos procesos a escala local, ni como se correlacionan con otros procesos ya conocidos y con el cañón del Chicamocha en sí, conforme a ello, se marca la necesidad de desarrollar el presente trabajo investigativo, donde, a la luz de nuevos datos tanto macroscópicos como microscópicos se nutre una discusión que permite un primer acercamiento a nuevos hallazgos y procesos en el cañón del Chicamocha.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Realizar la petrografía de las rocas aflorantes en la transecta de las veredas San pedro y San Antonio, Cañón del Chicamocha (Macizo de Santander) para determinar la proveniencia de sus clastos y sus condiciones de formación.

1.2. Objetivos específicos

Clasificar a escala macroscópica la textura y composición de los clastos conglomeráticos para establecer posibles fuentes de proveniencia.

Reconocer una posible fuente de proveniencia de los clastos mediante un estudio petrográfico en paralelo con los resultados texturales y composicionales a escala macroscópica.

Determinar las condiciones de formación mediante un estudio petrográfico.

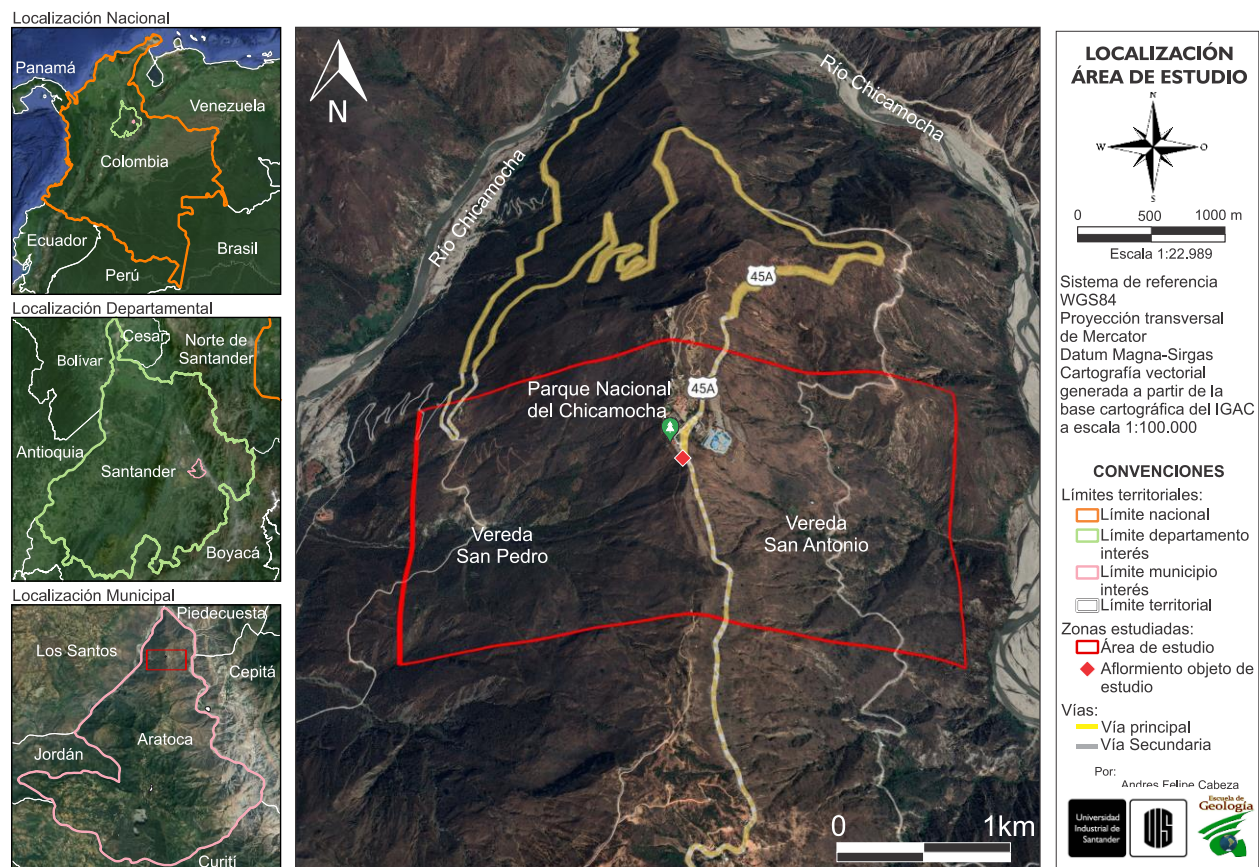
Sugerir una edad geológica relativa de las rocas objeto de estudio mediante los resultados del presente trabajo, las observaciones realizadas en campo e información bibliográfica.

2. Localización geográfica

La zona de estudio se encuentra en la parte norte del municipio de Aratoca, Santander entre las veredas San Pedro (al W) y San Antonio (al E), sobre la geofoma conocida como el cañón del Chicamocha. Abarca un área que limita al norte con el Parque Nacional del Chicamocha, al sur a 1 kilómetro del parque Nacional del Chicamocha, y en su parte E y W con el rio Chicamocha, sobre esta se haya el afloramiento de interés en las coordenadas proyectadas X: 1'118.723,739 m. E., Y: 1'242.524,244 m. N. y Z: 1.270 m.s.n.m., localización a continuación en la figura 1.

Figura 1

Localización área objeto de estudio



Nota. Localización a nivel país, departamental, municipal y local del área objeto de estudio.

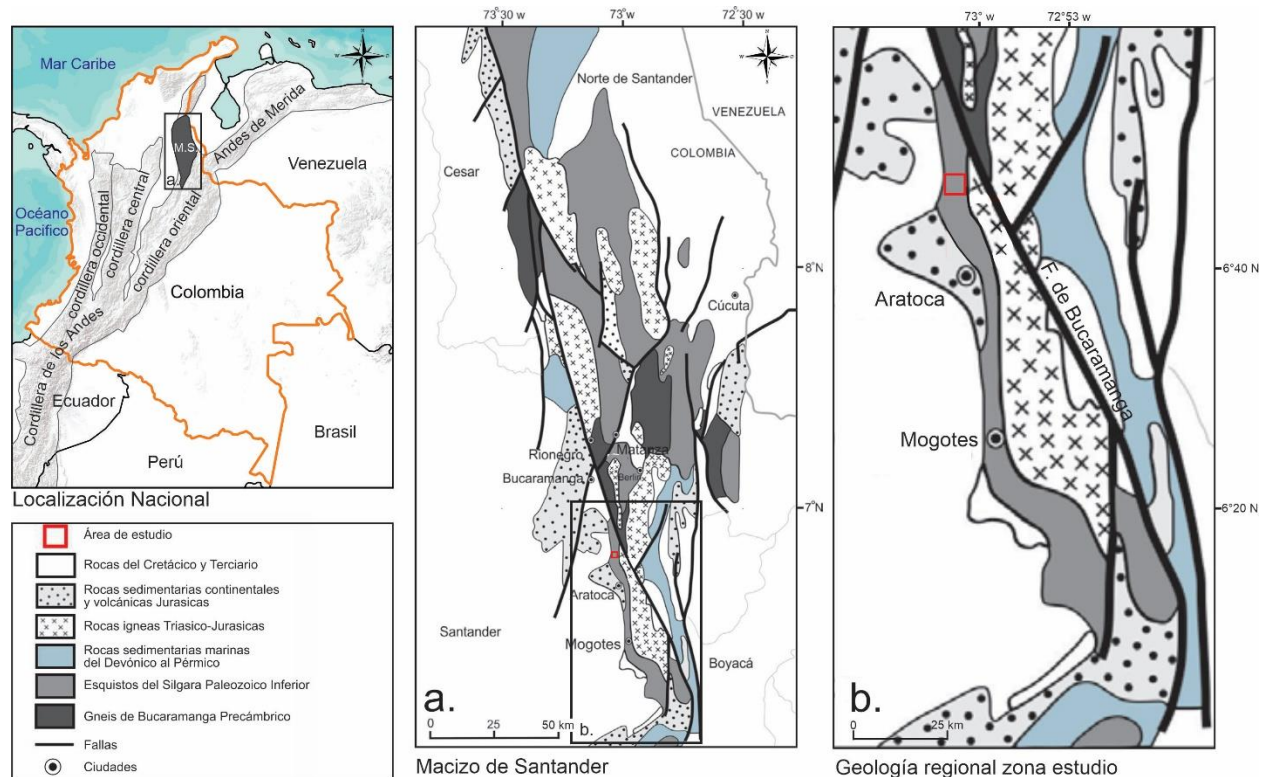
3. Antecedentes

3.1. Marco geológico regional

La zona de estudio se ubica en la parte sur del Macizo de Santander, en escalas regionales este se encuentra en la Cordillera de los Andes al margen W del continente suramericano (abarcando desde Chile hasta Venezuela), esta gran cadena montañosa ha sido subdividida en: Andes del sur, Andes centrales y Andes del norte (Gansser, 1973; Aleman y Ramos, 2000). Siendo de interés los Andes del norte, los cuales se contemplan desde la región de Amotape (Perú) hasta Venezuela.

Figura 2

Geología regional



Nota. Ubicación y geología regional del Macizo de Santander. a. Geología del Macizo de Santander. b. Geología zona de estudio. Modificado de Mantilla et al. (2016)

En el territorio Colombiano, los Andes pasan de ser una cadena montañosa a dividirse en: Cordillera Occidental, Cordillera Central y Cordillera Oriental (figura 2); siendo estas el resultado de su evolución geológica dominada por la acreción de diferentes terrenos, dentro de los cuales se encuentra el terreno Chibcha (Toussaint, 1993), lugar donde se localiza el Macizo de Santander, justo en la parte donde la Cordillera Oriental se bifurca alrededor del extremo sur de la Cuenca de Maracaibo, según Ward *et al.*, (1973) (figura 2).

El Macizo de Santander ha sufrido procesos de metamorfismo, magmatismo, deformación y sedimentación. Su basamento se compone de neises, esquistos y filitas de edades precámbricas a ordovícicas que han sido intruidos por granitoides de edades Paleozoicas y Jura-Triasicas, estando además en contacto con rocas sedimentarias Devónicas hasta Cuaternarias (Ward *et al.*, 1973; Mendoza y Jaramillo 1979; Royero y Clavijo, 2001).

La unidad más antigua que compone su basamento es el Neis de Bucaramanga (Goldsmith *et al.*, 1971; Ward *et al.*, 1973) compuesto principalmente de paraneises con presencia de anfibolitas, migmatitas, cuarcitas, mármoles y granulitas, que han sufrido metamorfismo regional dinamo-térmico (Royero y Clavijo, 2001) en la facie anfibolita alta, zona de la sillimanita (Mantilla *et al.*, 2016b); depositada entre los ~1300-1200 Ma. y una edad de metamorfismo entre los ~1100 y ~980 Ma. (Cordani *et al.*, 2005); asociándola a la Orogenia Grenvilliana.

Estratigráficamente posterior al Neis de Bucaramanga se encuentra la Formación Silgará (en términos de Ward *et al.*, 1973) que, según evidencias mostradas por Mantilla *et al.*, (2016a, b) proponen escindirla en: Esquistos del Silgará, Esquistos del Chicamocha y Filitas de San Pedro (mencionadas en orden estratigráfico de la más antigua a la más joven). La unidad Esquistos del Silgará, se compone principalmente de metaareniscas, cuarcitas, metagrauvacas, esquistos micáceos y filitas cloríticas (Ward *et al.*, 1973) con una edad máxima de depositación de ~900 Ma

(Mantilla *et al.*, 2016a), afectada por un evento metamórfico principal entre ~480-470 Ma (Van Der Lilej *et al.*, 2016); asociado a la Orogénia Famatiniana Principal en el proto-margen W de Gondwana. La unidad Esquistos del Chicamocha, está compuesta por cuarcitas, esquistos micáceos con granate, estauroлита, cianita/andalusita y sillimanita y metabasitas (Mantilla *et al.*, 2016b), con una edad máxima de depositación de ~500 Ma. (Mantilla *et al.*, 2016a) y metamórficamente también afectada por el evento Orogénico Famatiniano Principal; de manera coetánea a este evento se generó una serie de intrusiones ígneas sin-tectónicas que son el protolito de la unidad Ortoneis, descrita como un neis cuarzofeldespático, localmente hornbléndico; y con algunos cuerpos lenticulares de anfibolitas. (Ward *et al.*, 1973; Mantilla *et al.*, 2016a, b). La unidad Filitas de San Pedro es considerada la unidad metamórfica más joven dentro del basamento del Macizo de Santander, presenta rocas de muy bajo grado de metamorfismo, filitas cloríticas con muscovita/sericita intercaladas con metareniscas y metalimolitas (Mantilla *et al.*, 2016a) con una edad máxima de depositación de 450 Ma, siendo afectada por un posible evento Famatiniano Menor, el cual tuvo lugar a finales del Ordovícico Tardío ~450 Ma (Mantilla *et al.*, 2016b).

Posterior a los eventos de metamorfismo regional, se dieron paso variedad de pulsos magmáticos descritos por diversos autores y se desarrolló una anomalía termal de edad Triásico-Jurásica ~210-200 Ma, la cual, produjo algunos eventos metamórficos locales (Cardona *et al.*, 2016), historia termal que Mantilla *et al.*, (2009) resume en 6 diferentes pulsos magmáticos, mostrados a continuación en la tabla 1:

Tabla 1*Principales pulsos magmáticos en el Macizo de Santander*

Pulso	Descripción
1ro	Evento magmático granítico responsable de la formación de plutones y pegmatitas, asociados al Granito de Durania (Pamplona) de edad K-Ar en torno a 461 ± 10 Ma, (<i>Ward et al.</i> , 1973), generando controversia, dado que la edad obtenida, lo ubica en el mismo plano temporal que la Formación Ortoneis.
2do	Evento magmático responsable de la formación de la Metariolita de Onzaga, con una edad reportada en torno a $450,9 \pm 2,5$ Ma, según Rodríguez (2022).
3ro	Evento magmático entre diorítico a granítico, Asociado al Grupo Plutónico de Santander, con edades Rb-Sr y U-Pb de 210 Ma (Triásico-Jurásico) relacionadas a un importante evento magmático. (<i>Goldsmith et al.</i> , 1971; Polania, 1980; <i>Dorr et al.</i> , 1995).
4to	Evento magmático asociado posiblemente a diques riolíticos y de diabasas (¿magmatismo bimodal?), de 127 ± 3 Ma. Según dataciones K-Ar en sanidinas obtenidas a partir de diques porfíricos del sector de Ocaña (<i>Ward et al.</i> , 1973).
5to	Evento magmático con posible edad en torno a 57 ± 10 Ma, según edades Re-Os obtenidas a partir de concentrados de piritas de filones auríferos del área de California (<i>Mathur et al.</i> , 2003).
6to	Evento magmático entre 8.4 ± 0.2 y 9.0 ± 0.2 Ma. Según edades U-Pb en circones de cuerpos ígneos porfíricos del Distrito Minero de Vetas y California (<i>Mantilla et al.</i> , 2009).

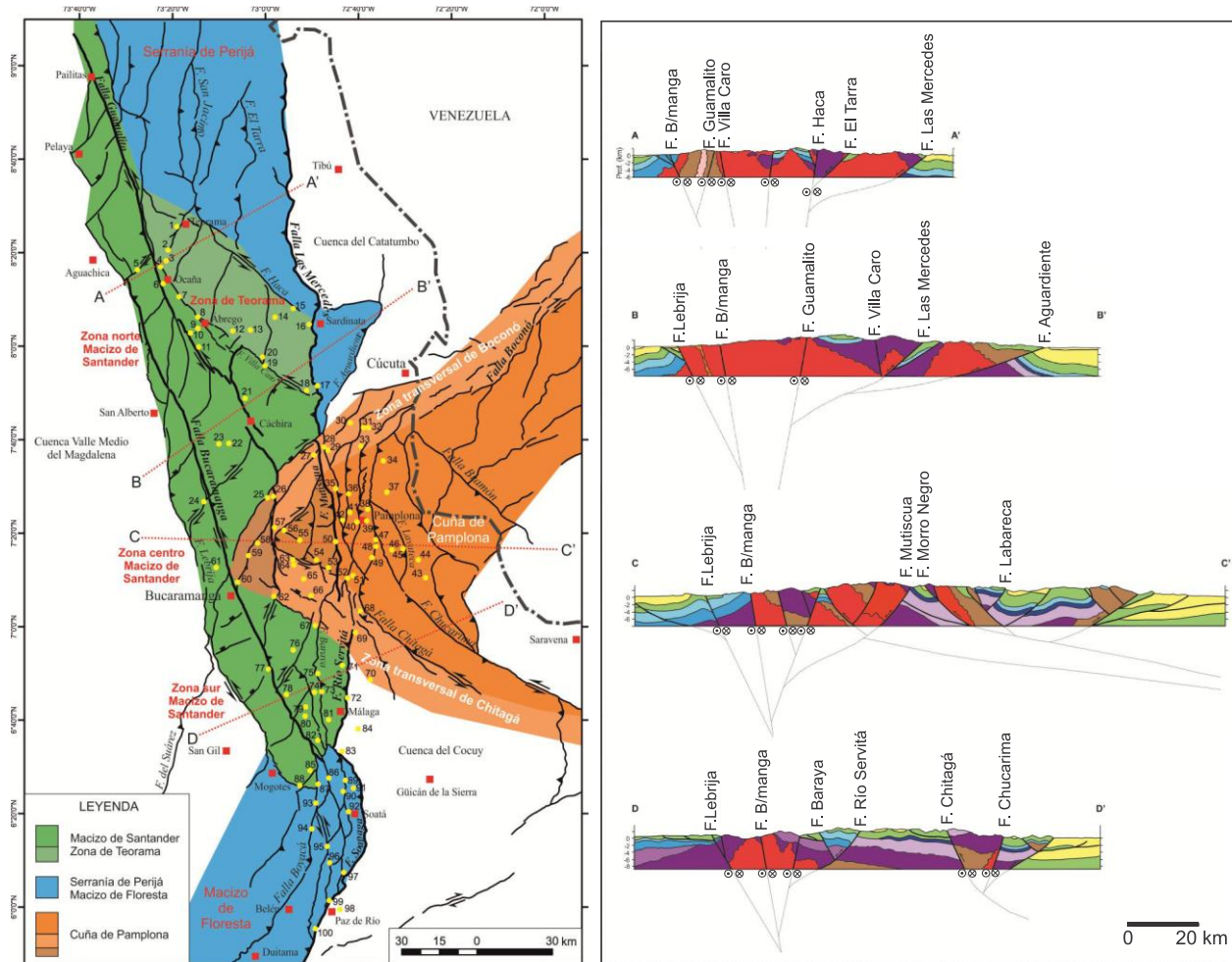
Nota. Se muestran los 6 principales pulsos magmáticos según lo manifestado por *Mantilla et al.*, (2009) teniendo en cuenta las edades actualizadas de diferentes autores.

Además, el Macizo de Santander sufrió eventos deformativos que generaron un estilo estructural de dominó transpresivo (figura 3) descrito por Velandia (2017), donde las fallas Río Servitá – Mutiscua – La Mercedes hacen parte de su estructura mayor, y junto con la Falla de Soapaga al sur, configuran el límite principal del denominado “Alto de Santander”, desde Floresta a Perijá (*Sarmiento*, 2001); Además, con el desarrollo de una estructura en flor positiva y simétrica de Bucaramanga con cinemática sinistral y componente inverso a lo largo de las fallas de

Bucaramanga como principal, Guamalito al E, Lebrija al W y, un desplazamiento dextral en las fallas ubicadas entre las fallas mayores (Ward *et al.*, 1973; Gómez *et al.*, 2015).

Figura 3

Geología estructural regional



Nota. El recuadro izquierdo ilustra las estructuras en el macizo de Santander y zonas aledañas divididas por los colores mostrados en la leyenda; el recuadro derecho ilustra la interpretación estructural de los cortes señalados en el recuadro izquierdo. Tomado de Velandia (2017).

3.2. Marco geológico local

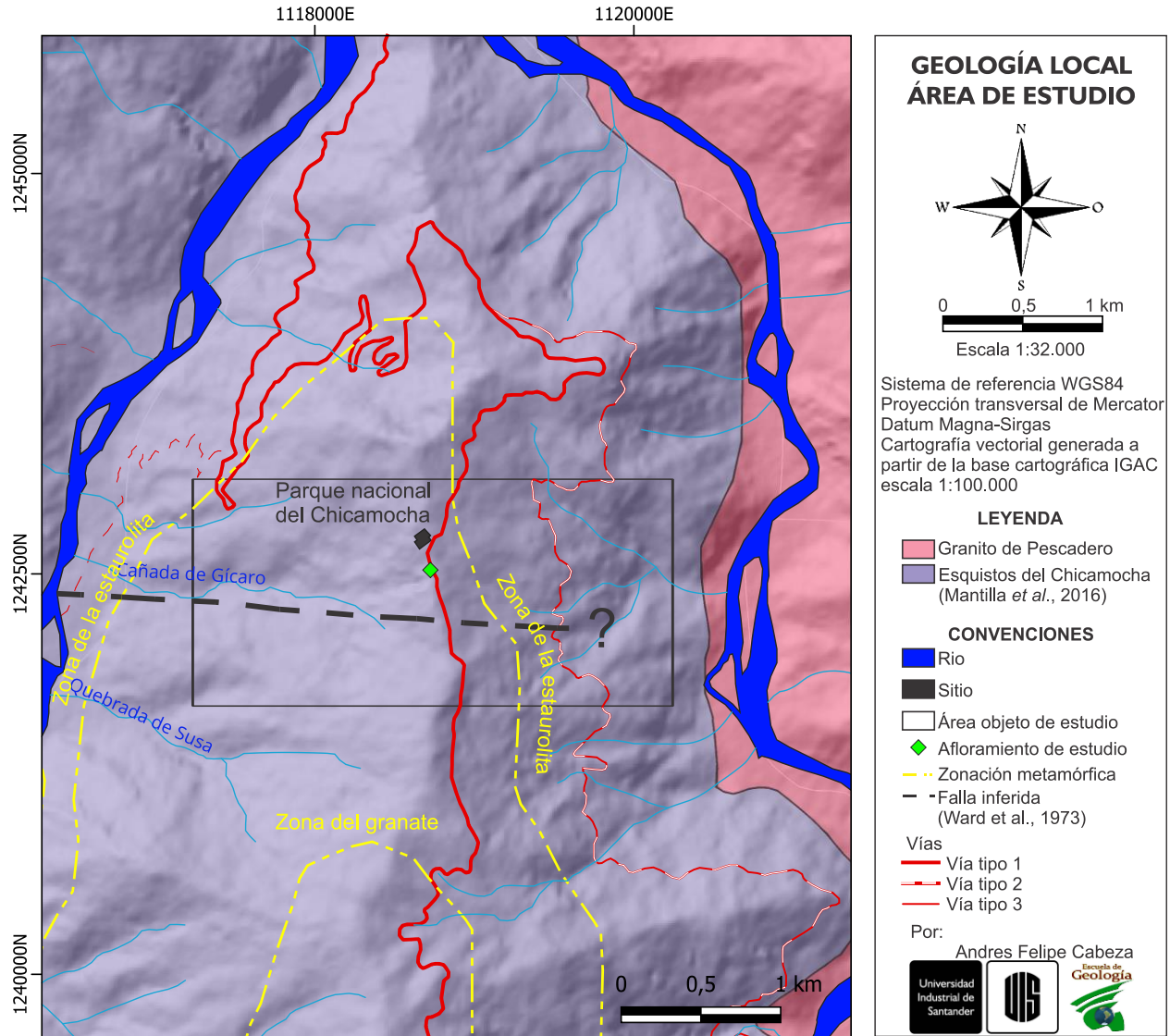
Las litologías objeto de estudio se encuentran suprayaciendo la formación Silgara (Ward *et al.*, 1973) sin embargo, como se mencionó anteriormente esta formación en toda su extensión presenta diferencias presentadas por Mantilla *et al.* (2016 a, b) las cuales serán acogidas para el presente proyecto investigativo, tratando a la unidad presente en la zona objeto de estudio como Esquistos del Chicamocha (figura 4).

3.2.1. Esquistos del Chicamocha

Esta unidad presenta metapelitas, metapsamitas y metabasitas. Las metapelitas están representadas litológicamente por esquistos con cuarzo, muscovita, biotita, clorita, plagioclasa, granate, andalucita, estaurolita, cianita y sillimanita como minerales principales; (Mantilla *et al.*, 2016a). Las metapsamitas, litológicamente son esquistos micáceo-feldespáticos y cuarcitas; compuestas de cuarzo, plagioclasa, microclina, cantidades variables y subordinadas de muscovita, biotita y granate como minerales principales (Mantilla *et al.*, 2016a). Las metabasitas son esquistos anfibólicos y anfibolitas que ocurren como niveles masivos de forma lenticular o cuerpos intermitentes intercalados hacia la parte media de la unidad con esquistos pelíticos; con plagioclasa, hornblenda, epidota, cantidades variables y menores de cuarzo, biotita, magnetita, ilmenita como minerales principales; (Mantilla *et al.*, 2016a). Además, se presenta una zonación metamórfica que va desde las facies esquistos verdes, transición epidota – anfibolita y anfibolita, pasando por la zona de la biotita, zona del granate, zona estaurolita – cianita y zona de la sillimanita. Con edades mencionadas en el marco geológico regional.

Figura 4

Geología local



Nota. Se muestra la geología en el área de interés. Adaptado de Mantilla *et al.* (2016a)

3.2.2 Falla de Bucaramanga

Es una de las estructuras más observadas a lo largo de la historia por sus característicos rasgos geomorfológicos, actualmente se define como una estructura de rumbo regional que se

extiende en dirección NW con un movimiento sinistral y un componente inverso importante (Royero y Clavijo, 2001). Según Velandia (2017) presenta un desplazamiento promedio de 23 Km en rumbo hasta llegar a la falla del río Manco, punto donde comienza su terminación sur hacia el Macizo de Floresta.

3.2.3. Falla de Lebrija

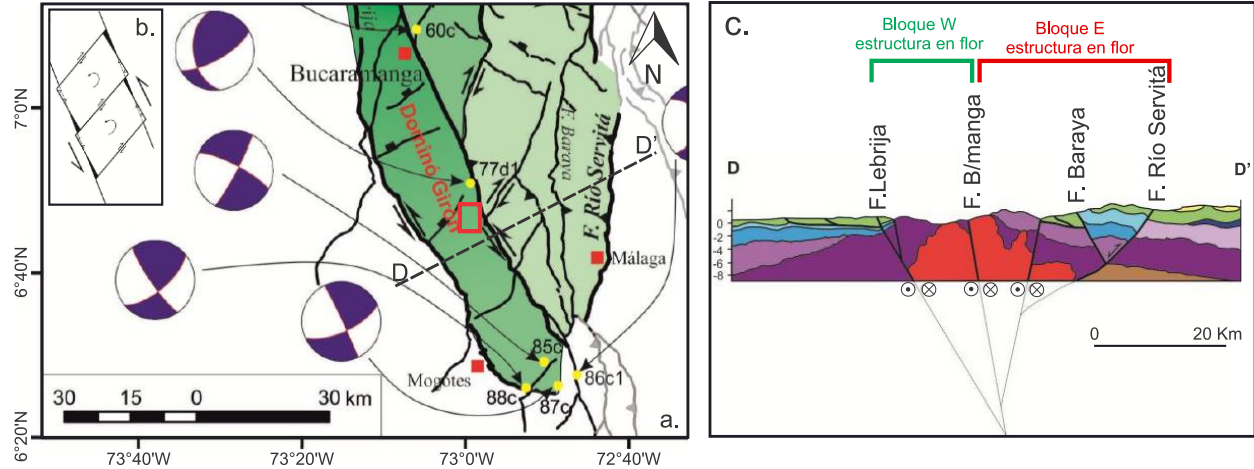
Se define como una estructura regional paralela a la Falla de Bucaramanga, pero al W; que pone en contacto rocas del Paleozoico y Jurásico en el bloque colgante al E, y unidades sedimentarias del Cretácico y Paleógeno en el bloque yacente al W (Vargas & Arias, 1981; Ward *et al.*, 1977). Teniendo atributos de falla inversa, con rasgos sinestrales (Velandia, 2017).

3.2.4. Interacción entre fallas

Entre la falla de Bucaramanga y la falla de Lebrija se configura el bloque W de la estructura en flor positiva de la falla de Bucaramanga (figura 5.c), estableciendo a la falla de Lebrija como el límite W del Macizo de Santander; Al mismo tiempo, este bloque es afectado internamente por la deformación desarrollando estructuras de carácter normal que podrían presentar características dextrales siguiendo un modelo de dominó estructural (figura 5.b) en respuesta a la cinemática de las fallas de Bucaramanga y Lebrija, razón por la cual Velandia (2017) designó a esta estructura el nombre de Domino Girón.

Figura 5

Geología estructural local



Nota. a. Muestra la ubicación de la zona de estudio dentro del Dominó Girón, b. Ilustra el modelo de domino, c. Muestra la interpretación estructural del corte en trazado en a destacando los bloques W y E de la estructura en flor. Adaptado de Velandia (2017).

4. Metodología

4.1. Fase de campo

Se realizó el reconocimiento de campo buscando características texturales, distribución espacial, competencia de la roca, relación con litologías circundantes, indicios de metamorfismo, toma de evidencias para la presentación del presente trabajo, y finalmente, la toma de muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

4.2. Fase de laboratorio

Una vez tomadas las muestras se realizaron cuatro etapas para su estudio: clasificación macroscópica, preparación de secciones delgadas, descripción petrográfica y microscopía electrónica de barrido (SEM).

a.) Clasificación macroscópica de muestras: para esta etapa se realizó la separación manual de los clastos conglomeráticos flotantes en la matriz de grano fino (debido a la poca cohesión presente en la roca objeto de estudio), en total fueron separados 60 clastos, cada uno con los códigos de reconocimiento que van desde el CLT-01, CLT-02, CLT-03... hasta el CLT-60. Posteriormente dichos clastos se clasificaron de manera textural según los parámetros de redondez y esfericidad propuestos por Powers (1953), y según su tamaño siguiendo lo manifestado por Wentworth (1922). Una vez obtenidos estos datos, se procedió a cortar a la mitad cada uno de estos clastos para así identificar su composición mineralógica mediante el uso de un estereomicroscopio Leica EZ4 (figura 7a), lo que permitió agruparlos según las características encontradas.

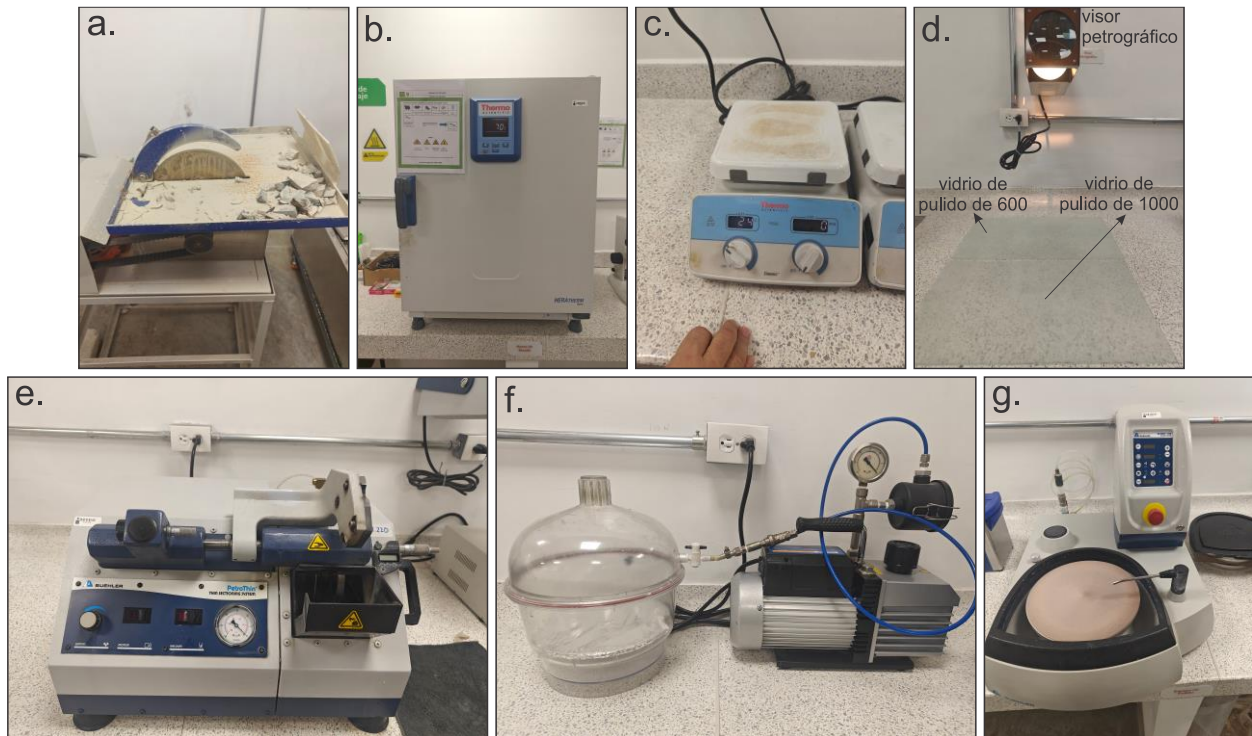
Luego de revisados los clastos, se procedió a caracterizar de manera uniforme dos muestras representativas obtenidas del afloramiento (ya que contaban con un mejor nivel de cohesión) codificadas como MTZ-01 y MTZ-02 observando ahora de manera completa la relación de los clastos embebidos en la matriz y el material que compone la matriz.

b.) Preparación de secciones delgadas: Teniendo identificado el material en la etapa anterior se realizó la preparación de 7 secciones delgadas doblemente pulidas (4 de material correspondiente a los clastos y 3 de material correspondiente a las muestras representativas) en las instalaciones del Parque Tecnológico Guatiguará en Piedecuesta, Santander, donde, para la óptima

preparación de cada muestra se utilizaron equipos de corte, horneado, calentamiento y pulido, mostrados en la figura 6, y siguiendo la metodología propuesta por el laboratorio.

Figura 6

Equipos de preparación de secciones delgadas



Nota. a. Cortadora – Tableteadora, b. Horno de secado HERAtherm, c. Planchas de calentamiento, d. vidrios de pulido de 600 y 1000 con el visor petrográfico, e. Equipo de corte y pulido PetroThin, f. equipo de vacío, g. pulidora de mesa EcoMet.

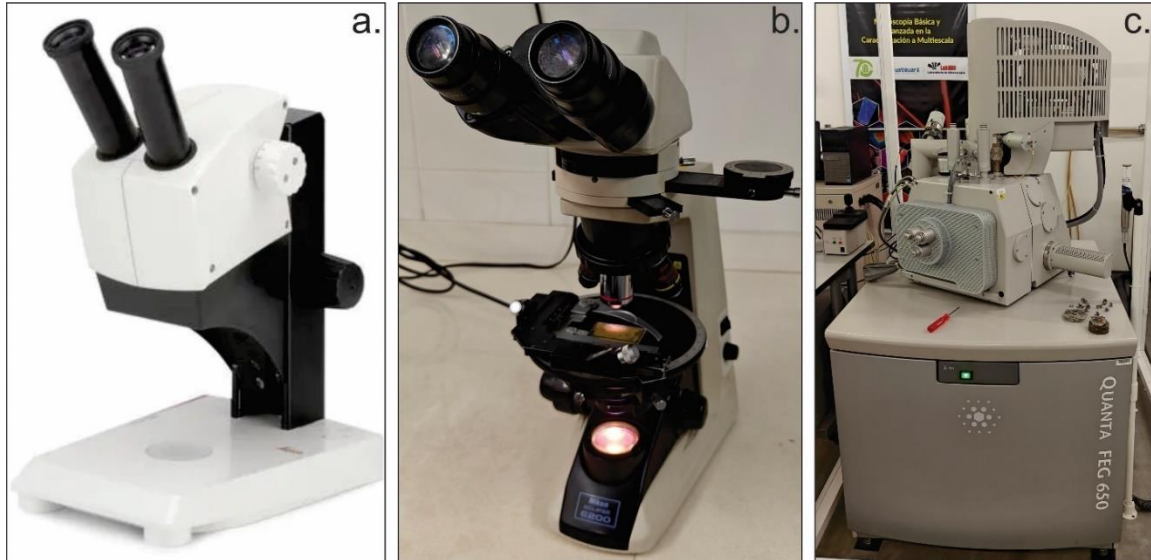
c.) Descripción petrográfica: Las secciones delgadas una vez preparadas fueron analizadas mediante microscopía óptica de luz transmitida en la Universidad Industrial de Santander, aprovechando el laboratorio de petrografía de la Escuela de Geología, salón 312, donde se utilizó

el microscopio NIKON Eclipse E200 50/POL (figura 7b), técnica que facilitó la identificación de especies minerales presentes en las 8 muestras preparadas, de igual forma amplió información textural que se observó en muestra de mano, y permitió ver más a detalle y de manera unificada como se relacionan la matriz y los clastos.

d.) Microscopia electrónica de barrido (SEM): Este análisis se realizó en las instalaciones del Parque Tecnológico Guatiguará en Piedecuesta, Santander, con la intención de identificar los minerales opacos presentes y la caracterización del material fino que compone la matriz en las muestras, para esto, las muestras fueron recubiertas con grafito (que mejora la conducción y permite el funcionamiento adecuado de la técnica) y colocadas sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbono, para situarlas en el Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 (figura 7c). Para la toma de imágenes, se utilizó una configuración de: Alto vacío y un voltaje de aceleración de 20 kV, usando un Everhart Thornley detector (ETD) para imágenes de Electrones secundarios (SE) y un Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD para las imágenes de electrones retrodispersados (BSE); Los análisis químicos manejaron un voltaje de aceleración de 20Kv y un detector EDAX APOLO X con resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) con el que se realizaron análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy) de la mano del Software EDX Genesis obteniendo la información semi-cuantitativa de los elementos químicos.

Figura 7

Equipos utilizados para la toma de datos



Nota. Equipos utilizados para los análisis. a. Estereomicroscopio Leica EZ4 para el análisis de muestras de mano, b. Microscopio Nikon Eclipse E200 50/POL - Microscopio de Polarización para el análisis de secciones delgadas, c. Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650.

4.3 Interpretación y sustentación de resultados

Obtenidos los resultados, se procede a interpretarlos y discutirlos mediante la elaboración de un documento final según los estándares de la universidad, dando respuesta al objetivo principal del proyecto y compartiendo los resultados públicamente mediante una sustentación.

5. Resultados

5.1. Geología del área objeto de estudio

Durante la fase de campo se reconocieron 4 afloramientos AND-01 como el afloramiento objeto de estudio y AND-02, AND-03 y AND-04 como afloramientos para establecer relaciones.

AND-01 se encuentra en las coordenadas proyectadas X: 1'118.723,739 m.E., Y: 1'242.524,244 m. N. y Z: 1.270 m.s.n.m. con una altura aproximada de 4.5 mts. y un largo cercano a los 13.7 mts. Presenta coloraciones amarillentas y una cohesión baja en consecuencia a los procesos de deformación que afectan a la litología (figura 8); está compuesto de clastos conglomeráticos de tamaños heterogéneos, que van desde unos cuantos centímetros hasta un poco más del decímetro, todos estos visibles al ojo, distribuidos de manera aleatoria en todo el afloramiento (figura 9 y 10). Estos clastos se encuentran de manera flotante en una matriz arcillosa de carácter friable (figura 9 y 10).

Figura 8

Afloramiento objeto de estudio



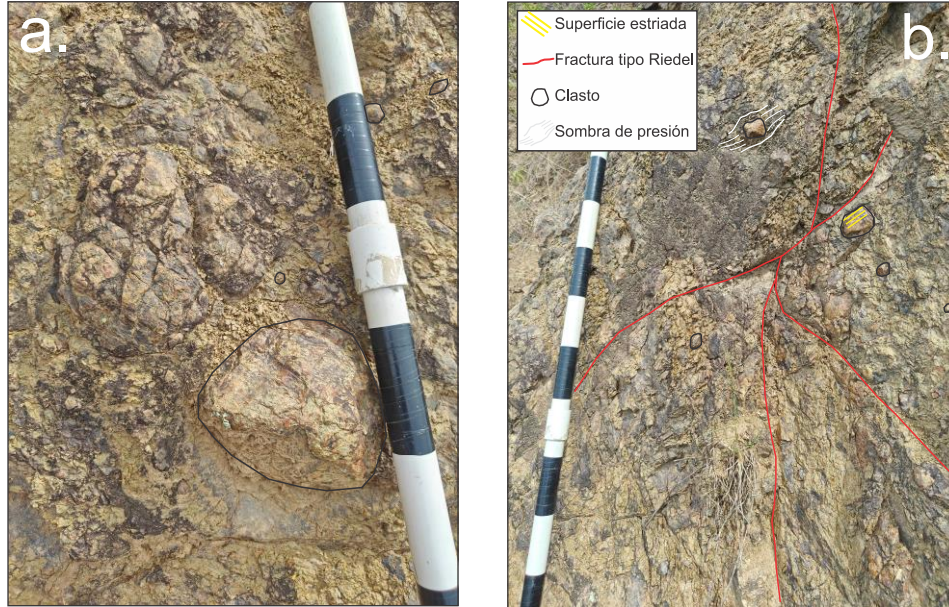
Nota. a. Afloramiento objeto de estudio, en la parte inferior izquierda se muestra su ubicación con el punto de vista desde donde se tomó la evidencia. b. Afloramiento iluminado, en líneas amarillas se muestra una dirección de foliación (S_n). En líneas rojas zonas de fallamiento. En líneas azules la dirección de fracturas principales.

Figura 9

Textura afloramiento objeto de estudio



Nota. Se muestra el aspecto textural del afloramiento de manera más cercana, cada franja de color del bastón posee 10 cm. se observa la relación de aleatoriedad y heterogeneidad de los clastos en la matriz, en la parte superior se desarrollan superficies estriadas con fracturas tipo Riedel, además los clastos también desarrollan superficies pulidas.

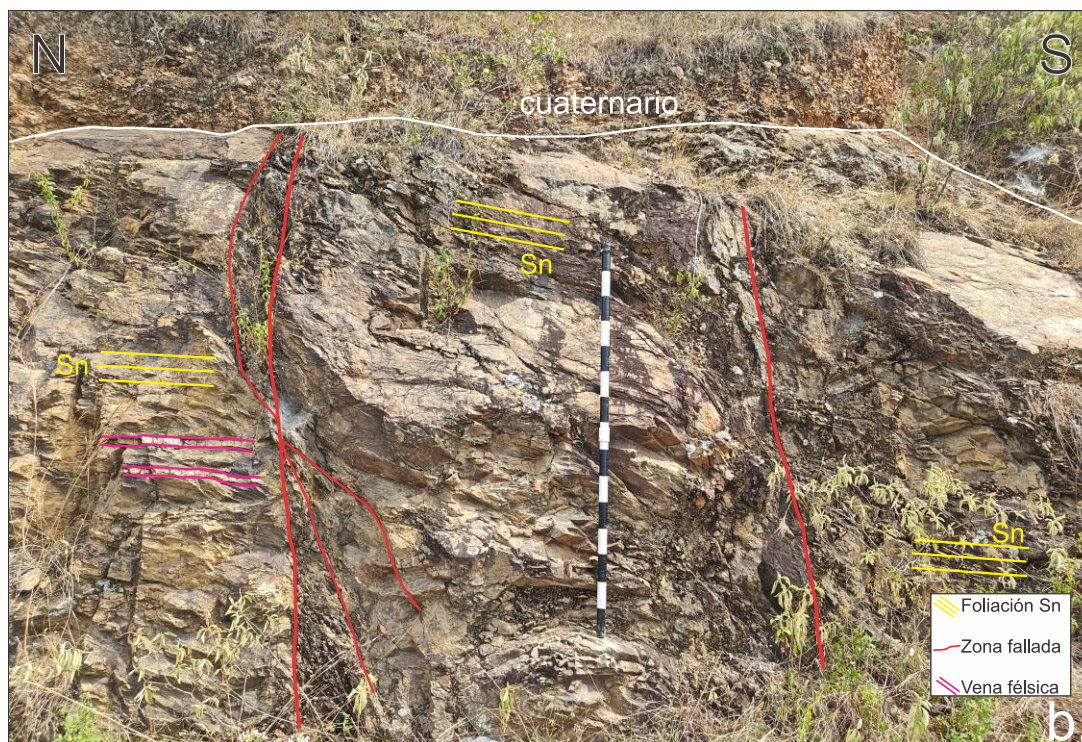
Figura 10*Características texturales del afloramiento*

Nota. Se muestra el aspecto textural del afloramiento de manera más cercana, cada franja de color del bastón posee 10 cm. a. clasto de más de 10 cm. b. se tiene una zona de mayor deformación, nuevamente la relación de los clastos con la matriz y en la parte superior se observa como un clasto es envuelto por la matriz, simulando una sombra de presión.

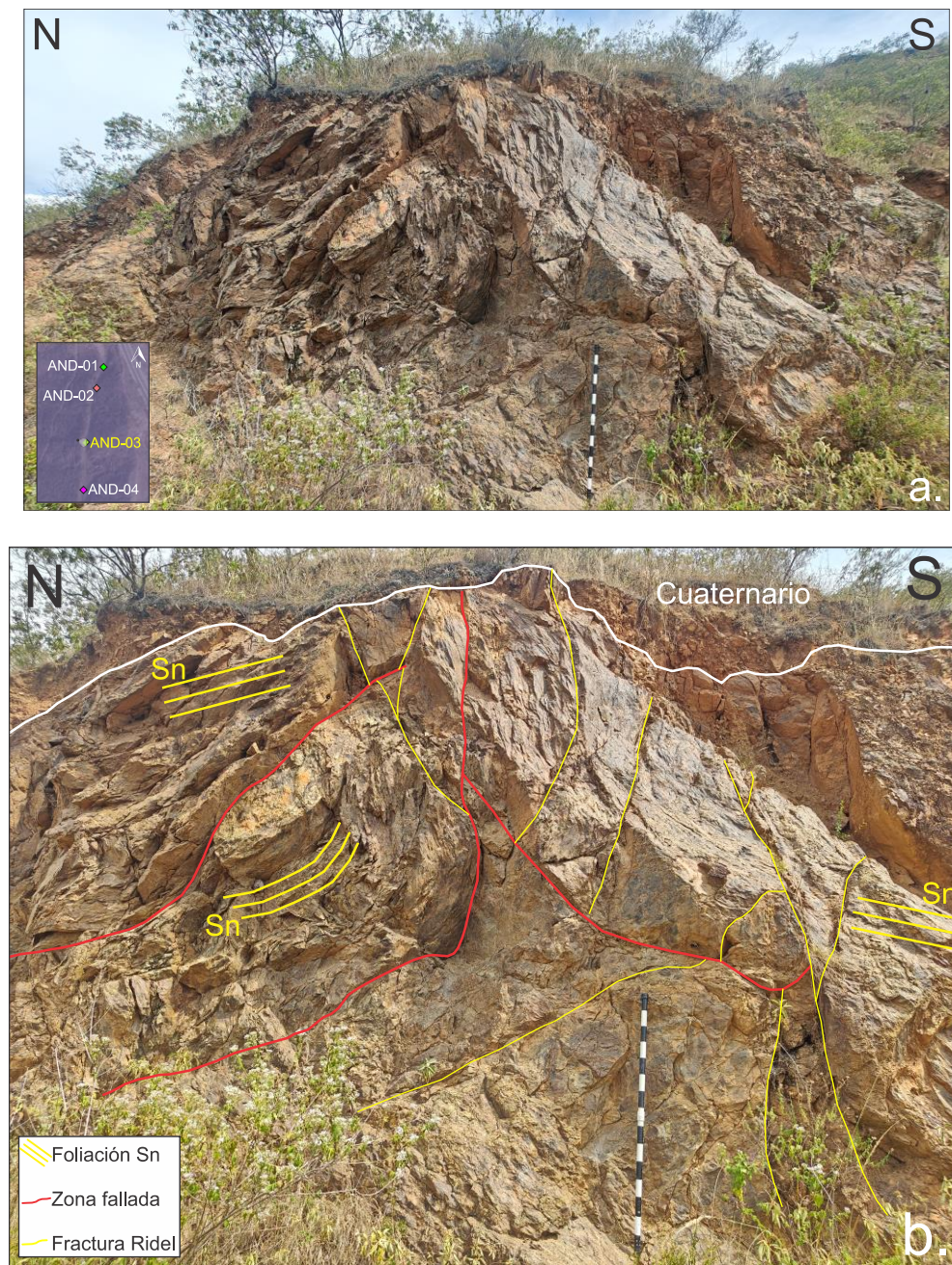
Los afloramientos AND-02 y AND-03 se encuentran algunos metros más adelante en dirección sur al afloramiento objeto de estudio (encontrándose respectivamente, primero a AND-02 y después a AND-03), ellos exponen coloraciones grisáceas oscuras con moteados amarillentos, perteneciendo litológicamente a cuarcitas presentes en los Esquistos del Chicamocha, en la facie esquistos verdes, zona del granate (Mantilla *et al.*, 2016 a, b) su foliación (S_n) no puede generalizarse a una dirección específica, pues han sido afectadas estructuralmente, AND-02 posee una altura aproximada de 2 mts. y un largo cercano a los 8 mts, allí se encuentran venas félsicas

principalmente de cuarzo y plagioclasa de manera concordante al sentido de la foliación, y dos zonas donde se acumula la deformación, fomentando el desarrollo de algunas estructuras tipo Riedel, (figura 11); AND-03 posee una altura aproximada de 3,5 mts. y un largo cercano a los 5 mts, siendo mayormente deformado por fallamiento y fracturas conjugadas tipo Riedel, en la figura 12 se muestra lo correspondiente a este afloramiento, destacando que se iluminan las estructuras principales presentes en el mismo, ya que, como su densidad de fracturamiento es alta, se pueden observar más patrones de fractura o diaclasas de las que se iluminaron.

El afloramiento AND-04 se encuentra en las coordenadas proyectadas X: 1'242.458,67 m.E., Y: 1'118.711,29 m. N. y Z: 1.270 m.s.n.m. con una altura aproximada de 2 mts. y un largo mayor que en el mostrado a continuación, sin embargo, en la figura 13 su largo es cercano a los 2 mts. es un depósito cuaternario por caída de gravedad, donde se pueden observar las formas angulosas en los clastos, la heterogeneidad en sus tamaños, y su distribución al azar en toda su extensión, este se encuentra desarrollando procesos de denudación formando pequeños surcos y cárcavas en estadios poco evolucionados, se resalta, que luego de revisarlo, se encuentra un clasto subredondeado, con la superficie pulida y de coloración oscura, aspectos muy similares a los clastos encontrados en el afloramiento objeto de estudio AND-01 y que difieren de la morfología de los clastos observados en este tipo de depósitos.

Figura 11*Afloramiento de cuarcita AND-02*

Nota. a. Afloramiento, en la parte inferior izquierda se muestra su ubicación con el punto de vista desde donde se tomó la evidencia. b. Afloramiento iluminado, En líneas amarillas se muestra la dirección de foliación, en líneas rosas las venas félsicas y en rojo las zonas de fallamiento.

Figura 12*Afloramiento cuarcita deformada AND-03*

Nota. a. fotografía del afloramiento, en la parte inferior izquierda se muestra su ubicación b. Afloramiento con estructuras principales iluminadas, en 3 líneas amarillas se muestra la dirección de foliación, en líneas rojas zonas de fallamiento y en líneas amarillas fracturas tipo Riedel.

Figura 13*Depósitos por gravedad AND-04*

Nota. a. se muestra el afloramiento de los depósitos por gravedad, su ubicación se da en el minimapa en la parte inferior izquierda con el punto de vista desde donde se tomó la evidencia. b. acercamiento al afloramiento donde se destacan sus características texturales y la presencia del clasto con similitudes a los del afloramiento objeto de estudio.

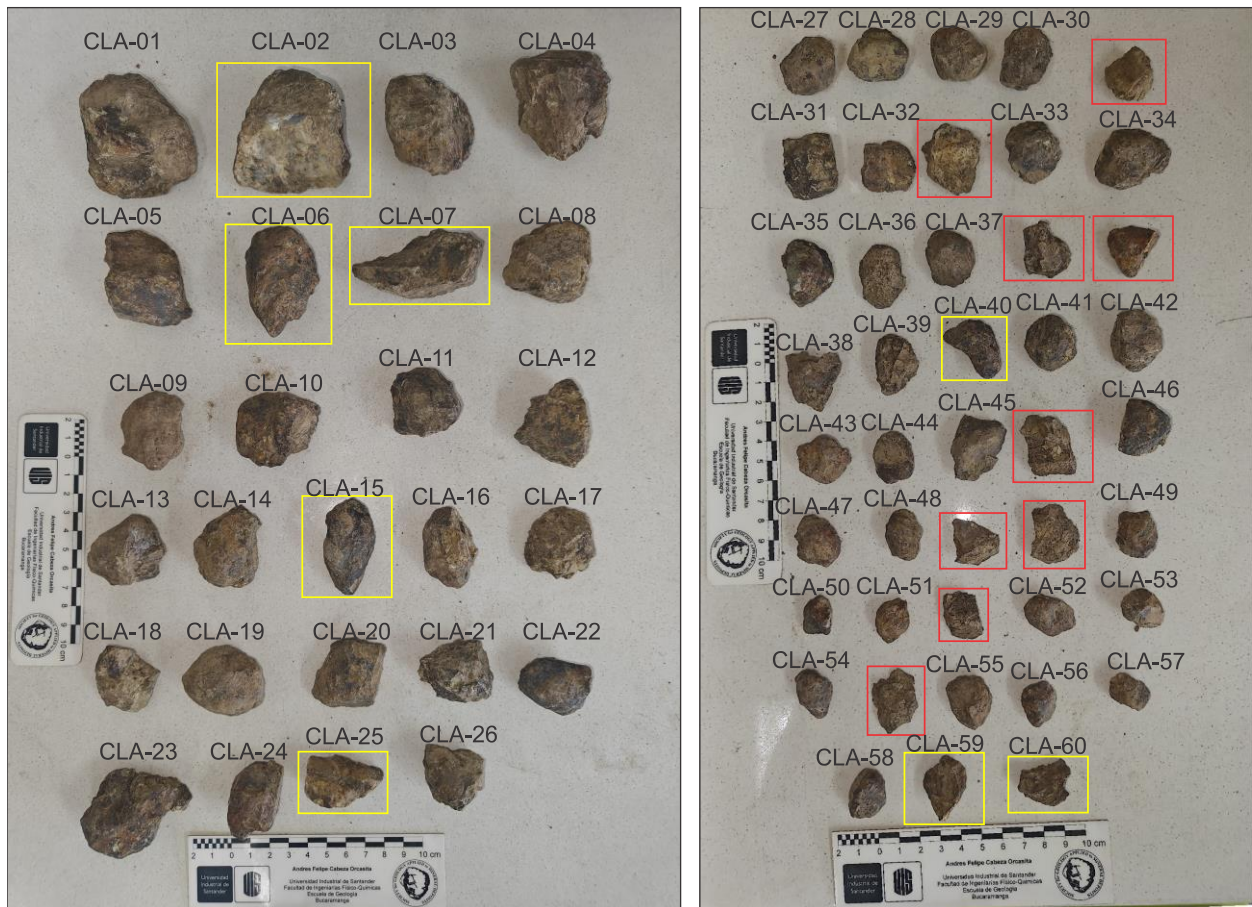
5.2. Descripción macroscópica

De las muestras tomadas en el afloramiento objeto de estudio, fueron encontrados clastos y fragmentos en diferente estado, que se filtraron según su textura, mineralogía y morfología

dejando para el estudio sesenta clastos, de los cuales, el material que no fue tomado en cuenta correspondió a la matriz, mostrado en la figura 14.

Figura 14

Muestras de clastos



Nota. Clastos conglomeráticos del afloramiento objeto de estudio, se observan sus tamaños, y aspectos morfológicos, en rectángulos amarillos se señala el material en forma de fragmento que fue tenido en cuenta para el estudio y en rectángulos rojos aquellos que no fueron tenidos en cuenta.

El primer criterio de caracterización para los clastos fue su tamaño, utilizando las proporciones según Wentworth (1922), donde se considera que un clasto es conglomerático cuando su diámetro está en el rango >2 mm e igual a 4.096 mm; esta categoría se subdivide en: gránulo para clastos de >2 mm a 4 mm en su diámetro, guija para clastos de >4 mm a 64 mm en su diámetro, canto para clastos de >64 mm a 256 mm en su diámetro y bloque para clastos de >256 mm a 4.096 mm en su diámetro (tabal 2); y agregando también el criterio de esfericidad de Powers (1953), los clastos se clasificaron según su semejanza o no a una esfera, puesto que presentan dos características singulares: la superficie de ellos se encuentra pulida, y además, presentan una dirección preferencial de alargamiento (posibles evidencias de una deformación, pero hasta este punto no puede ser afirmado).

Tabla 2

Clasificación de tamaños de clastos conglomeráticos según Wentworth (1922)

Tamaño de grano (mm)	Clasificación de tamaño
>256 mm a 4.096 mm	Bloque
>64 mm a 256 mm	Canto
>4 mm a 64 mm	Guija
>2 mm a 4 mm	Gránulo

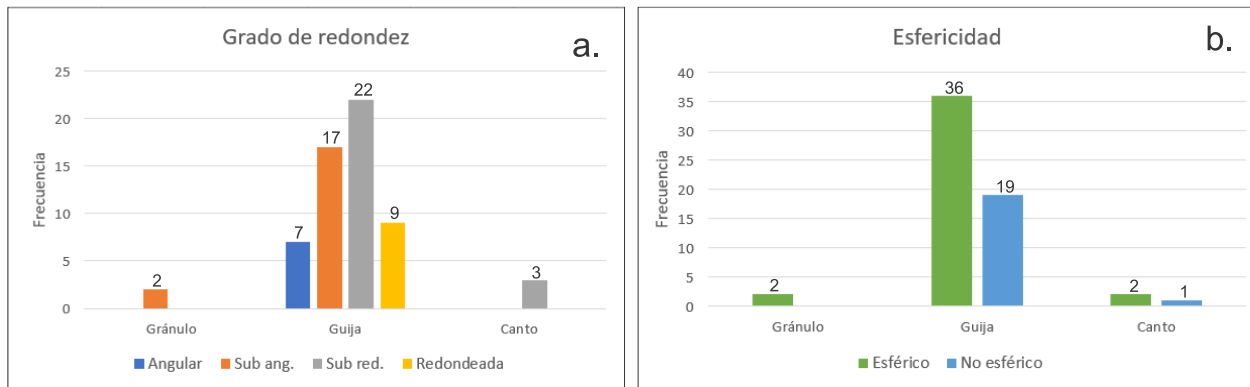
Nota. Clasificación propuesta por Wentworth (1922) para los clastos conglomeráticos.

En ese orden de ideas, de los 60 clastos estudiados: El 3% pertenecieron a gránulos (2 clastos), siendo ambos subangulares y esféricos; el 92% pertenecieron a guijas (55 clastos), de los cuales 7 fueron angulares, 17 subangulares, 22 subredondeados y 9 redondeados, con 36 de carácter esférico y 19 de carácter no esféricos; y finalmente el 5% pertenecieron a cantos (3

clastos), siendo todos subredondeados, con 2 esféricos y 1 no esférico, mostrando de manera más clara e ilustrada la información anteriormente descrita a continuación en la figura 15.

Figura 15

Distribución textural de clastos



Nota. Distribución de los diferentes atributos texturales. a. grado de redondez. b. esfericidad.

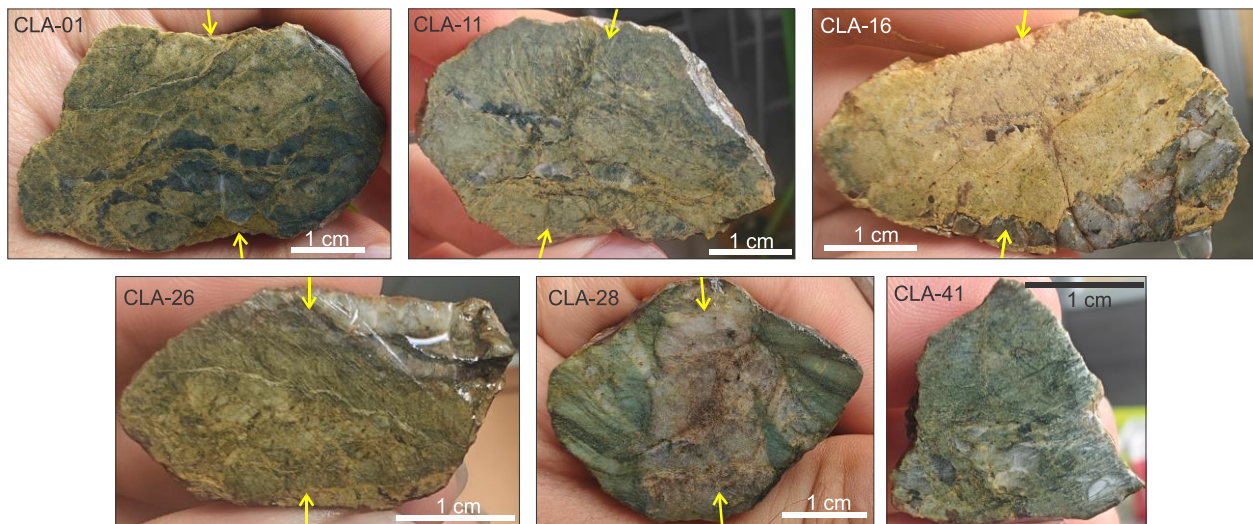
Posteriormente se observó el contenido mineral de los clastos, permitiendo según sus características, la agrupación en 3 diferentes grupos: clastos con alteración, clastos de cuarzo, clastos de composición riolítica y un clasto metamórfico cuarcítico.

Los clastos con alteración están caracterizados por tener una composición principalmente de cuarzo, acompañados de biotita, moscovita, y minerales opacos de hábito cúbico con oxidación rojiza a manera de accesorio, su aspecto físico en general dificulta la identificación de otras especies minerales que pudieran estar presentes en muestra de mano; estos clastos también han sido expuestos a eventos deformativos que permitieron el desarrollo de fracturas contundentes y en enjambre, generando espacios que fueron rellenados con un material arcilloso de coloración amarillento, lo cual, sumado a la formación de clorita a partir de la biotita (biotitas con una

coloración verdosa) podría presumir de la existencia de un evento de alteración, además, se resalta que la mayoría de los clastos presentan una dirección preferencial de elongación, mostrando en vectores amarillos la posible dirección de compresión que cada clasto sufrió (figura 16).

Figura 16

Clastos con alteración



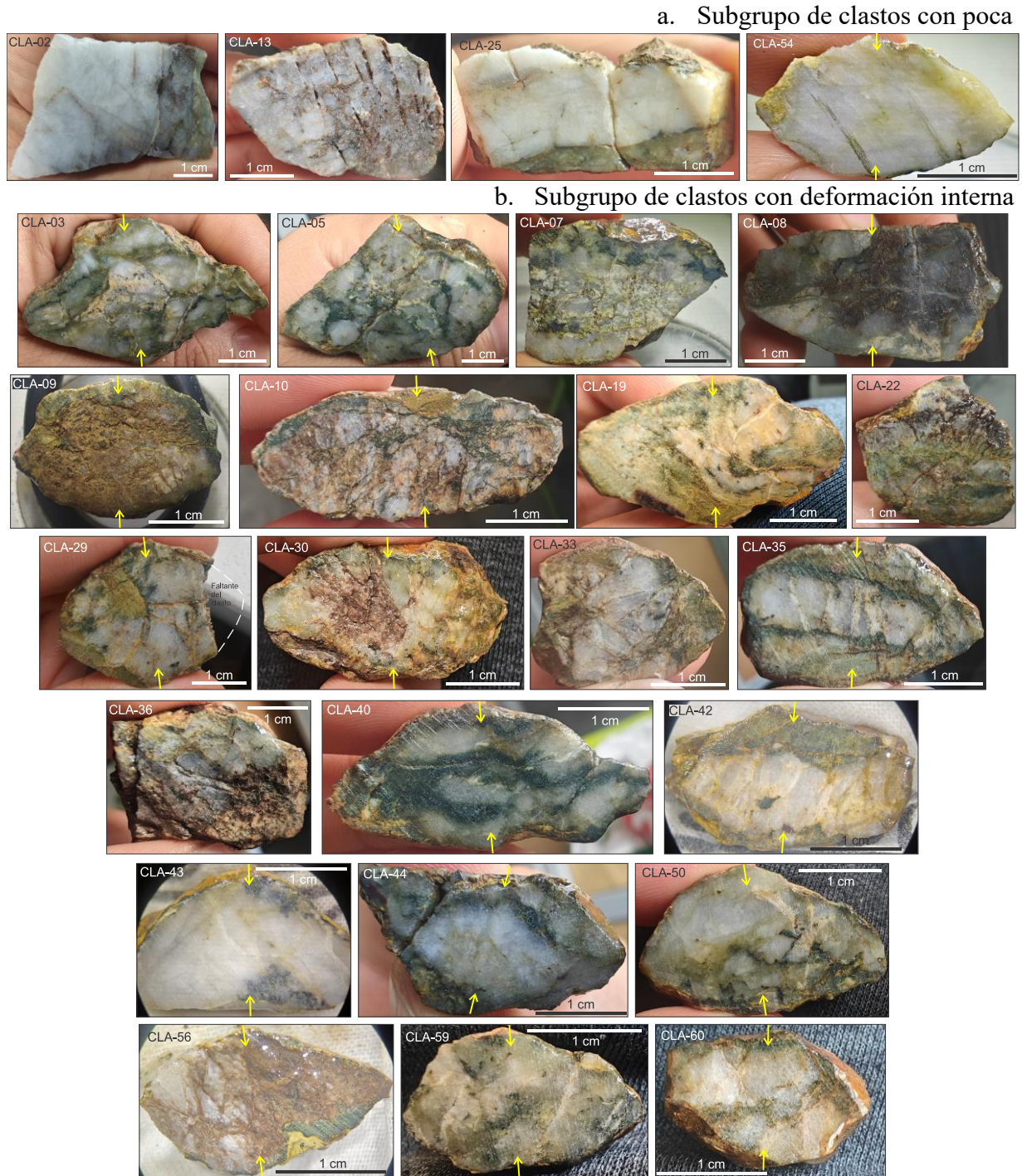
Nota. Se muestra el aspecto físico de los clastos con alteración, en vectores de color amarillo se muestra la dirección de un achatamiento en cada clasto.

Los clastos de cuarzo se presentan con un aspecto cristalino y nítido (posiblemente asociados a un evento hidrotermal), han sufrido eventos deformativos que generaron fracturas parcial o totalmente rellenas de biotita con cierto grado de oxidación y con coloraciones verdosas asociadas a alteración clorítica, a manera de accesorio se da un mineral opaco de hábito cúbico y oxidación rojiza. Estos clastos presentan un subgrupo con una morfología angulosa a subangulosa, manifestando poco o nada de deformación en su estructura (figura 17a), mientras, el otro subgrupo

exhibe una morfología subangulosa a subredondeada con evidencias de deformación como: una frecuente dirección preferencial de elongación del clasto (mostrando en vectores amarillos la posible dirección de compresión), considerándose de baja esfericidad; fracturas sinuosas (estructuras de presión disolución) rellenas de biotita que se encuentran alterando a clorita (cloritización), y además, fracturas perpendiculares a las anteriores, sin relleno alguno (figura 17b).

Figura 17

Clastos de cuarzo



Nota. Se muestra el aspecto físico de los clastos de cuarzo, el subgrupo con poca deformación interna y el subgrupo con mayor deformación interna.

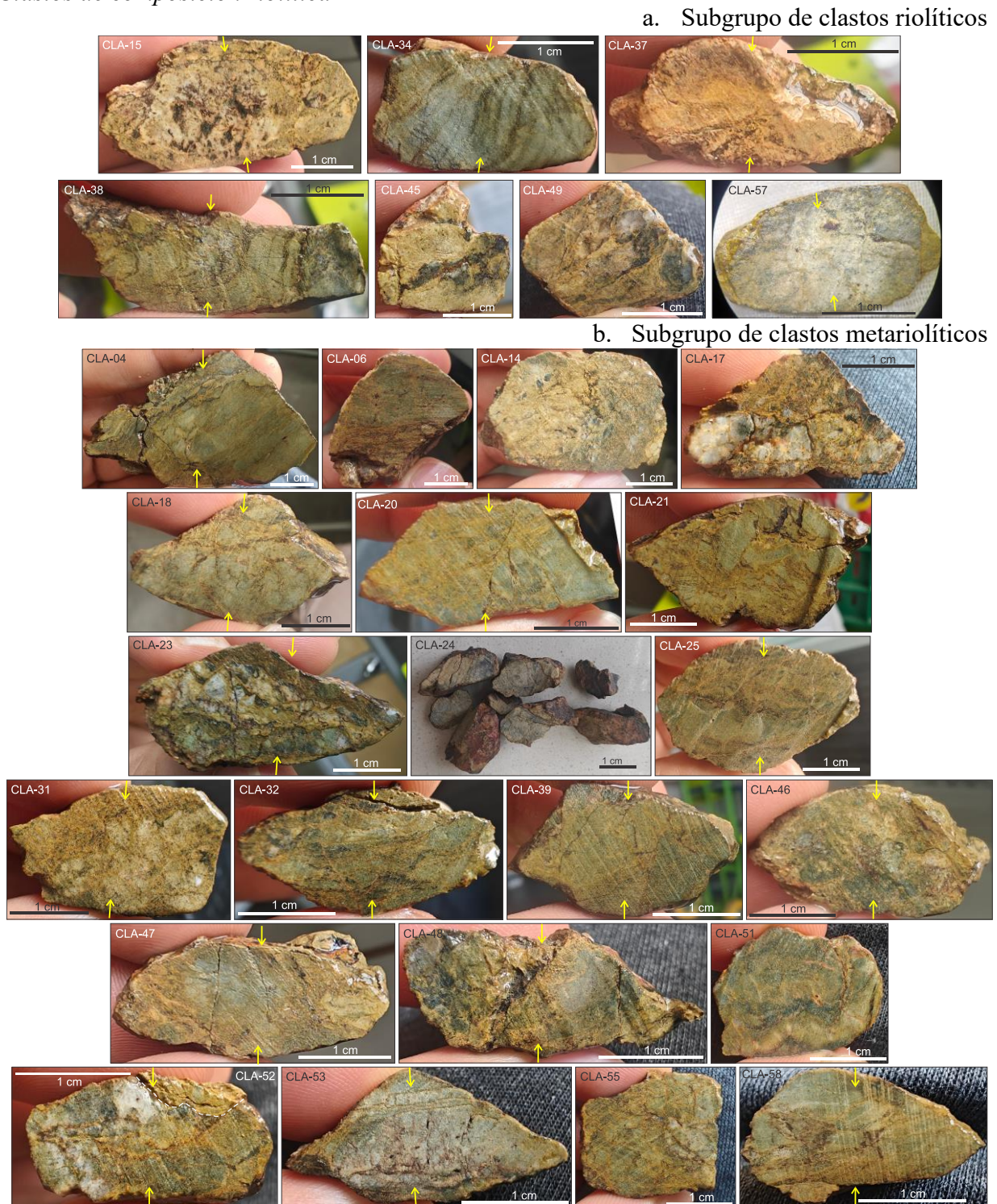
Si se observa detalladamente, el clasto CLA-10 (figura 17) en su parte superior se encuentra relleno de material muy fino de coloración amarillento, dejando ver algo similar a una superficie de sedimentación que semeja la cara lateral de cavidad rellena, dicha superficie se desarrolla de manera oblicua a la posible dirección de compresión mostrada en vectores amarillos, inmerso en este material también se observan clastos de cuarzo de carácter redondeado.

Los clastos de composición riolítica se caracterizan por tener una morfología subangulosa a subredondeada y una dirección de elongación preferencial (mostrando con vectores amarillos la posible dirección de compresión en la figura 18), razón por la cual presenta una baja esfericidad; su textura es granular, compuesta por cristales de tamaño fino observables bajo el estereoscopio, como mineral principal se encuentra el cuarzo, acompañado de plagioclasa que ha sido alterado y removilizado dejando los cristales de cuarzo (y en consecuencia su textura granular), también posee biotita que se encuentran alterando a clorita (cloritización); y adicional en algunos clastos aparece el desarrollo de piritas oxidadas en hábitos cúbicos (con coloraciones oscuras). Aquí se halla un subgrupo netamente de riolitas que posee poco o nada de deformación en su estructura interna, presentando solo algunas fracturas, y coloración predominantemente en tonos amarillentos (figura 18a); y otro subgrupo meta-riolítico que presenta evidencias de deformación frágil con el desarrollo de una alta densidad de fracturamiento en diferentes zonas de cada clasto, dichas fracturas se encuentran rellenas de material arcilloso de coloración amarillento (figura 18b).

Si se observa detalladamente, el clasto CLA-52 en su parte superior derecha está relleno de material muy fino de coloración amarillento, dejando ver algo similar a una superficie de sedimentación que semeja el fondo de la cavidad del clasto, dicha superficie se desarrolla de manera oblicua a la posible dirección de compresión mostrada en vectores amarillos, inmerso en este material también se observan clastos de cuarzo de carácter redondeado.

Figura 18

Clastos de composición riolítica

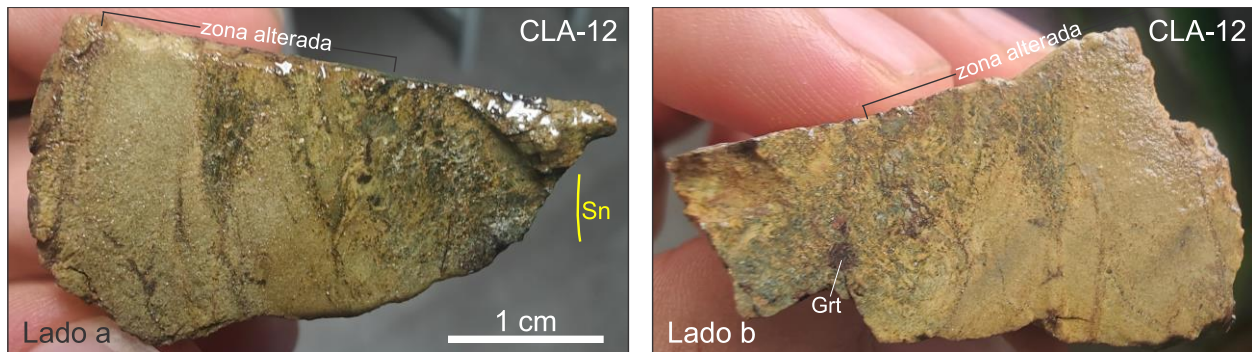


Nota. Se muestra el aspecto físico de los clastos netamente riolíticos y metariolíticos.

Por último, se tiene el único clasto hallado con características metamórficas que puede asociarse a los esquistos del Chicamocha, presenta una dirección de foliación Sn con cuarzo, plagioclasa y biotita y moscovita como minerales principales, granate como mineral accesorio e indicador de metamorfismo, se encuentra alterado hacia un extremo por lo cual desarrolla una baja cohesión, una textura más granular y alta porosidad, mientras hacia el otro extremo aún conserva sus características litológicas con una mayor cohesión y con baja o nula porosidad.

Figura 19

Clasto metamórfico



Nota. Se muestra el aspecto físico de la cuarcita por ambos lados después de cortada a la mitad.

Ahora, habiendo terminado de observar las muestras correspondientes a los clastos, se analizan las características relacionadas a las muestras que mejor representan el afloramiento objeto de estudio codificadas como MTZ-01 y MTZ-02, al observar la muestra MTZ-01, se revela que su composición es principalmente arcillosa de coloraciones amarillentas (material correlacionable con el que estaba relleno de cavidades en los clastos) mostrando diferentes planos horizontales y oblicuos que demarcan una dirección de orientación mineral de este material, allí se encuentran inmersos clastos conglomeráticos de tamaños heterogéneos, con las mineralogías

mostradas anteriormente (cuarcíticos, riolíticos y metamórficos) y morfologías con alargamientos en los clastos más grandes que coinciden con la dirección preferencial global de orientación mineral de toda la muestra, siendo esta de manera horizontal u oblicua (en relación a la evidencia fotográfica, pues la muestra no se encuentra orientada). Se agrega que dichos clastos son envueltos por el material arcilloso de manera concordante a su dirección de elongación mostrado en la figura 20 y 21, rasgos o indicios de un posible evento deformativo de carácter dúctil; la distribución de estos clastos en el material arcilloso puede mantenerse de manera aleatoria como se manifestó en la descripción del afloramiento (figura 9 y 10).

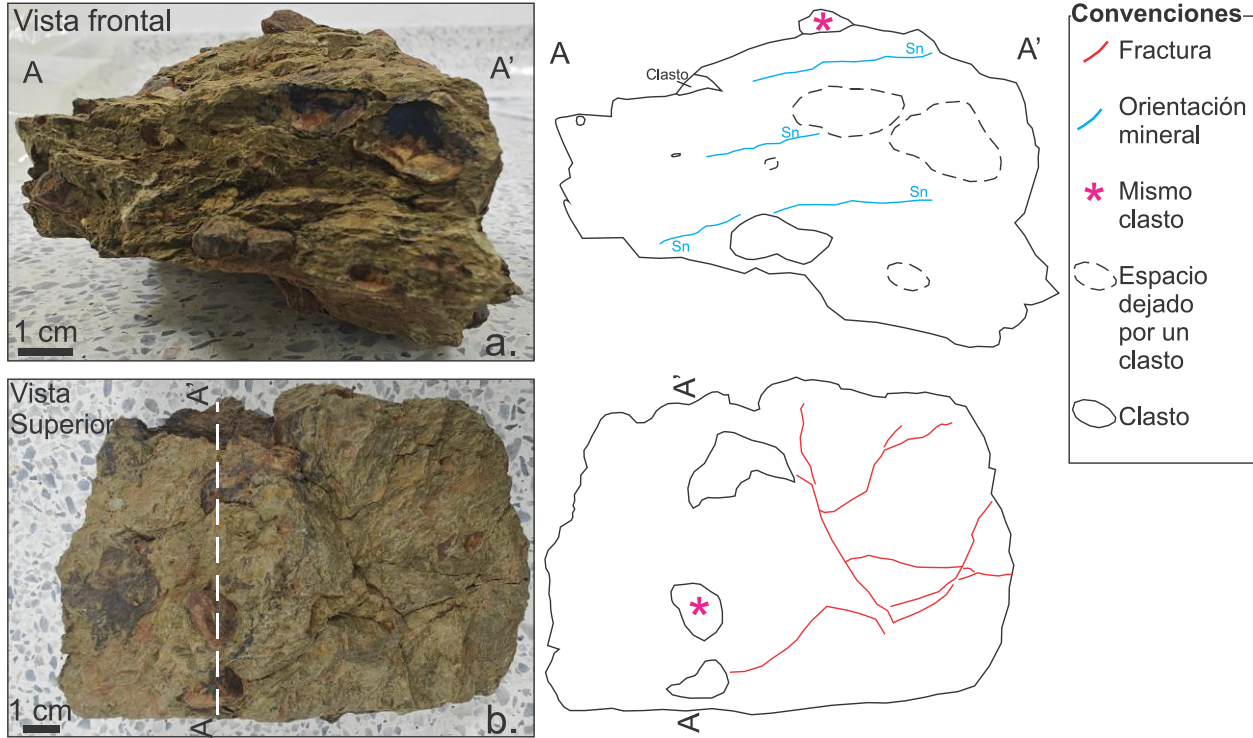
Además, se encuentran patrones de fractura horizontales u oblicuos (mismos que en los clastos alargados).

La muestra MTZ-02, presenta las mismas características texturales y composicionales que la muestra anterior (MTZ-01), sin embargo, hay que agregar que a diferencia de MTZ-01, MTZ-02 desarrolla en varias de sus caras superficies pulidas y estriadas (figuras 22, 23 y 24), lo cual deja en evidencia la manifestación de un evento deformativo frágil, característica que pondría a la roca en el campo de las cataclasitas, sin embargo, hasta este punto de la investigación, su configuración textural no muestra del todo lo que se esperaría ver en una roca de falla como esa, por ello, solo se puede asegurar una superposición de un evento de carácter frágil.

Manifestando de manera resumida que se trata de una roca matriz-soportada y deformada la que constituye el afloramiento objeto de estudio.

Figura 20

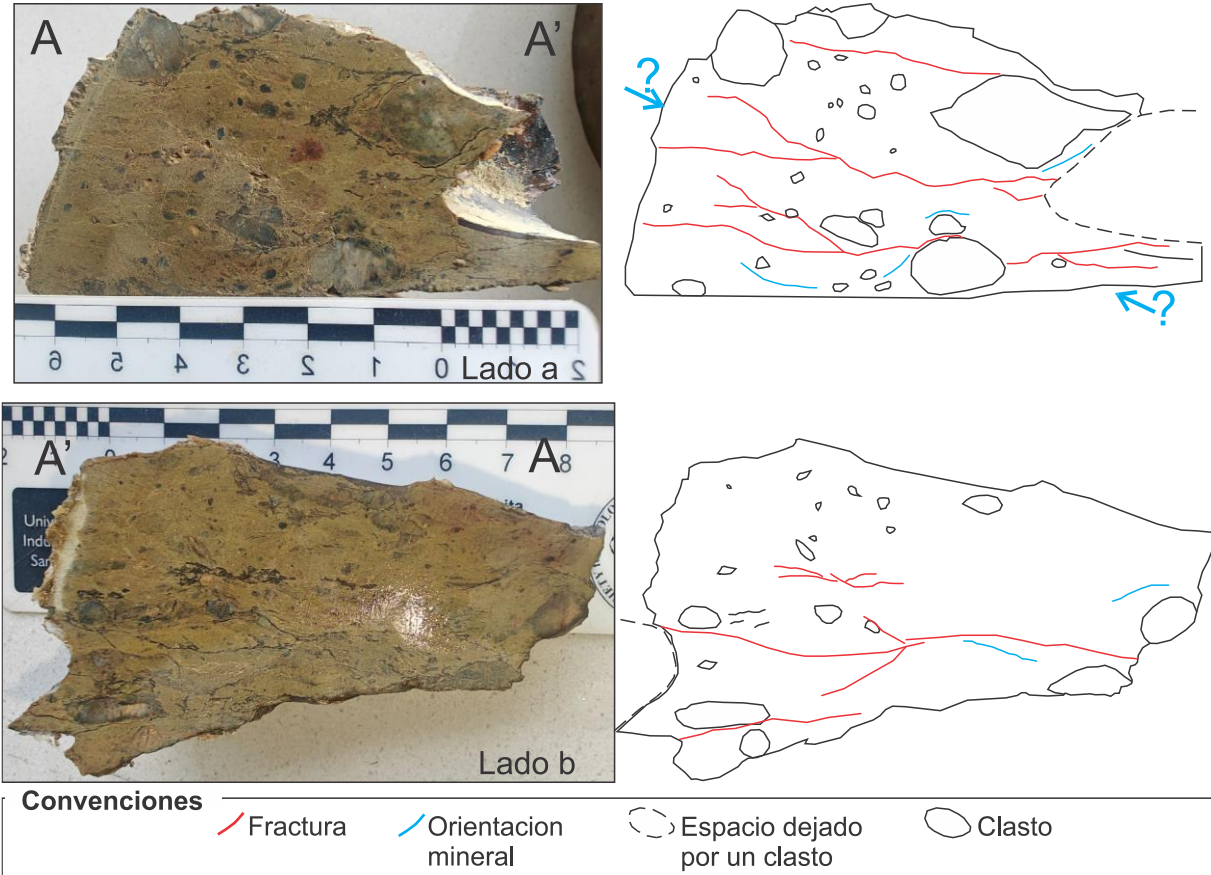
Muestra de mano representativa del afloramiento (MTZ-01)



Nota. Se muestra el aspecto físico en muestra de mano del afloramiento de interés en a. Se muestra en una vista frontal, en b. la vista superior, en ellas se destaca su relación entre el material más fino y los clastos conglomeráticos.

Figura 21

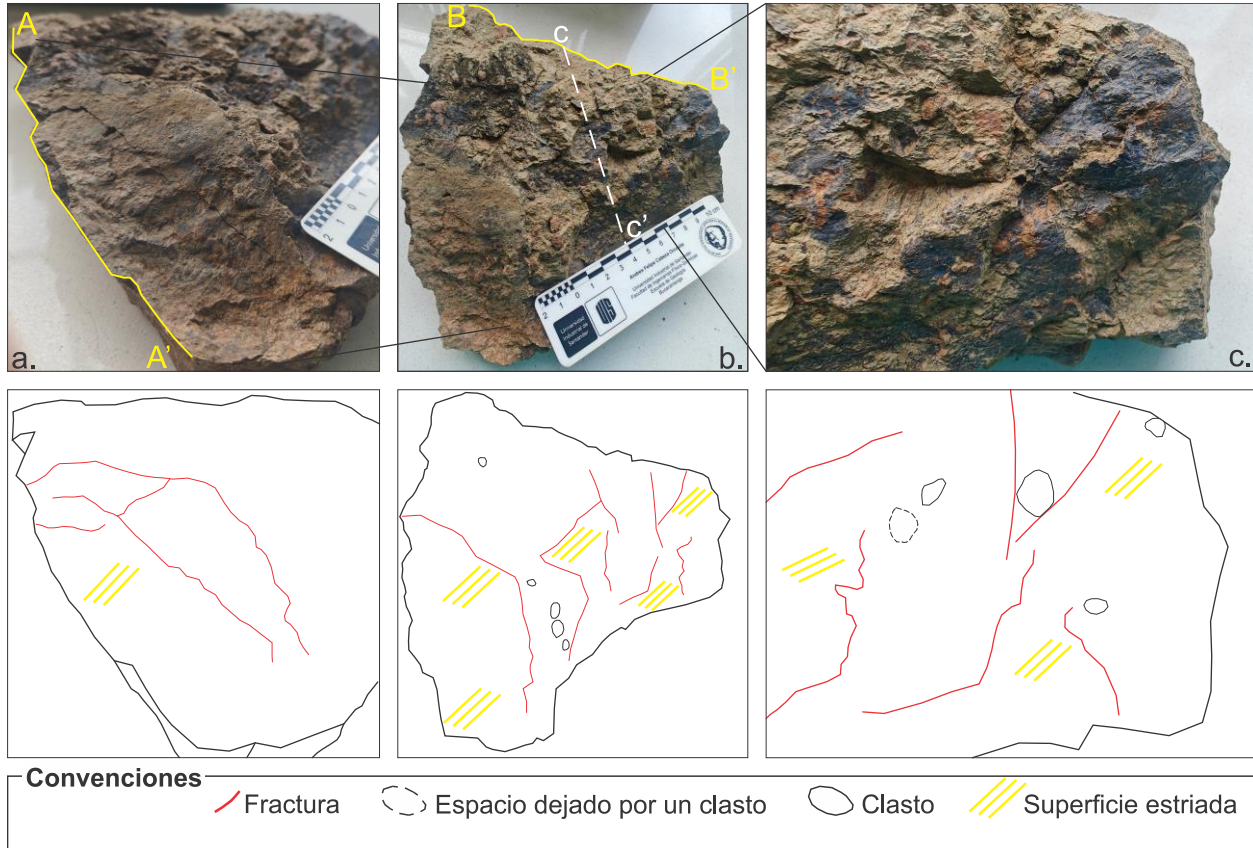
Muestra de mano del afloramiento Mtz-01 en el corte A-A'



Nota. Se muestra el aspecto físico interno en muestra de mano del afloramiento de interés donde se destaca su relación entre el material más fino y los clastos conglomeráticos, donde se percibe una matriz arcillosa que no permite hacer muchas apreciaciones en muestra de mano, una orientación mineral lineal, sumado de clastos elongados y patrones de fracturas con lo cual podría sugerirse la existencia de un vector de dirección de esfuerzos mostrado en las flechas azules, que podría explicar la relación espacial de todos los elementos mencionados.

Figura 22

Muestra de mano representativa del afloramiento (MTZ-02)

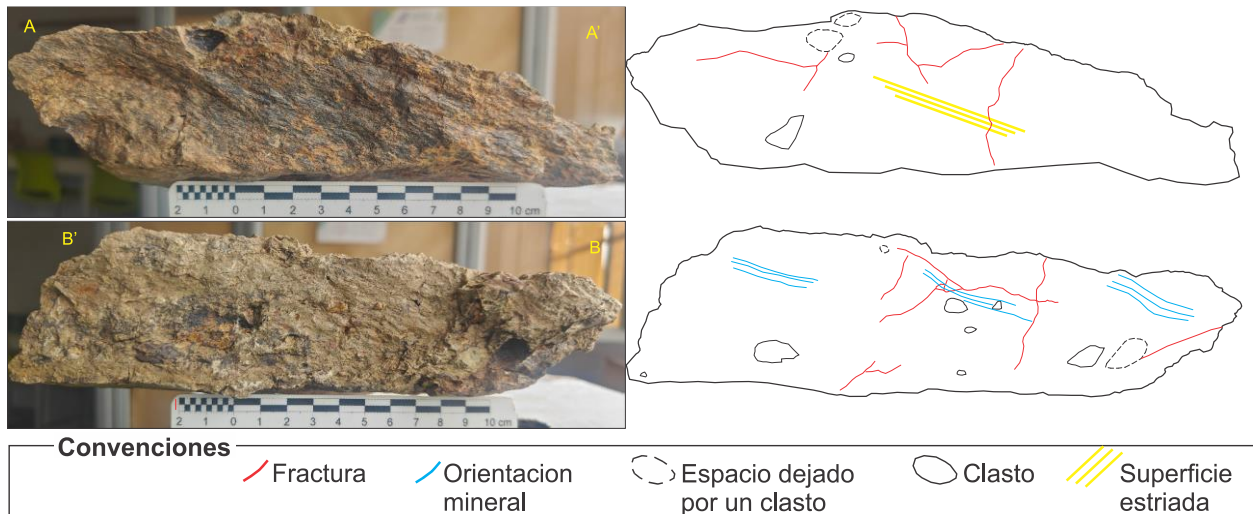


Nota. Se muestra el aspecto físico en muestra de mano MTZ-02 del afloramiento de interés donde presenta una composición principalmente arcillosa de coloraciones amarillentas y oscuras que no permite hacer muchas apreciaciones en muestra de mano, con clastos conglomeráticos inmersos en el material arcilloso, compartiendo las mismas características que la muestra Mtz-01, sin embargo, esta en su vista superior presenta superficies pulidas y estriadas señaladas con líneas de color amarillo, y también algunas fracturas en líneas de color rojo, en a. se muestra un acercamiento de la parte izquierda de la muestra donde se observa claramente estas estructuras, en b. se presenta la muestra en su completitud y en c. se muestra el acercamiento del lado derecho de

la muestra donde se observan las estructuras ya descritas. Además, se muestran los cortes A-A', B-B' y C-C' que serán tratados a continuación.

Figura 23

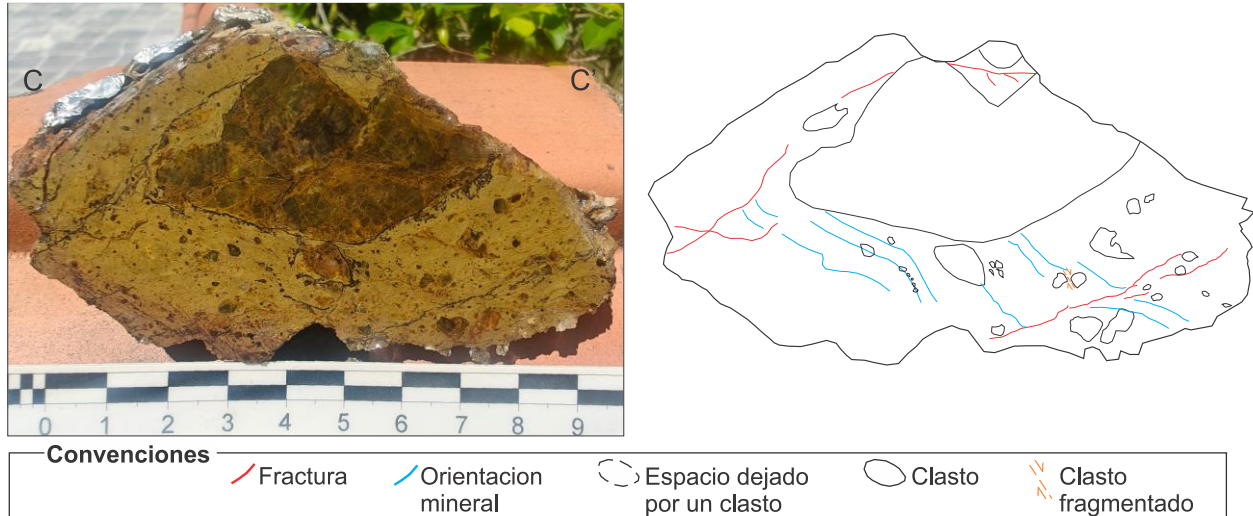
Vistas laterales en A-A' y B'-B de la muestra MTZ-02



Nota. Se muestra el aspecto físico en la muestra de mano MTZ-02 del afloramiento de interés, en la imagen superior esta la vista lateral A-A' (señalada en la figura 22a) donde se da el desarrollo de una superficie pulida y estriada; en la imagen inferior esta la vista lateral B'-B (señalada en la figura 22b) en ellas se destaca su relación entre el material más fino y los clastos conglomeráticos, siendo una roca matriz soportada que presenta una lineación mineral y clastos elongados, de manera coherente.

Figura 24

Vista del corte C-C' de la muestra MTZ-02



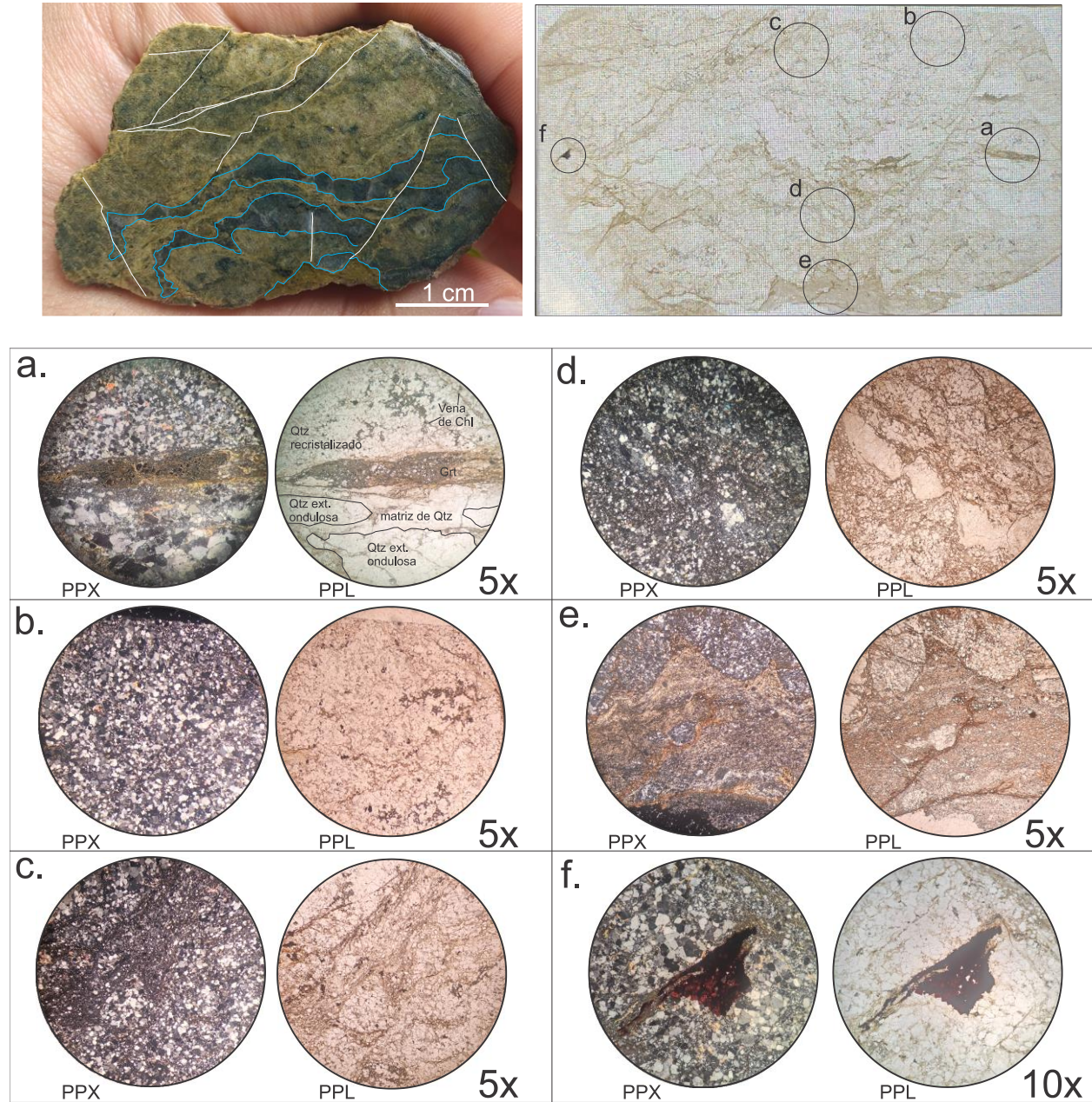
Nota. Se muestra el corte en dirección C-C' (señalado en la figura 22b) en la muestra de mano MTZ-02 del afloramiento de interés, aquí se observa la presencia de material arcilloso de coloración amarillento que soporta la roca, en él se encuentran inmersos pequeños fragmentos que van desde tamaños arenosos hasta el gran clasto/fragmento de coloración amarronada de tamaño guija; el material de la matriz posee una lineación de estos fragmentos más pequeños (señalada en líneas azules), clastos de aspectos elongados, un clasto fracturado y desplazado (mostrado en colores naranjas), y el gran clasto se encuentra elongado de manera horizontal siendo todo coherente con una posible dirección de flujo de envuelve al clasto de gran tamaño.

5.3. Análisis petrográfico

La petrografía del clasto CLA-01 muestra que su composición es principalmente de cuarzo acompañado de biotita, moscovita y granate, por lo tanto, se le caracteriza como una cuarcita bimicácea con granate, la cual sufrió un evento de recristalización, posteriormente un evento de deformación frágil acompañado de una cloritización ya que sus los minerales hojosos y el granate se encuentran alterando a clorita sumado de sericita y minerales opacos, mostrando dichas características en la figura 25.

Figura 25

Petrografía del clasto CLA-01



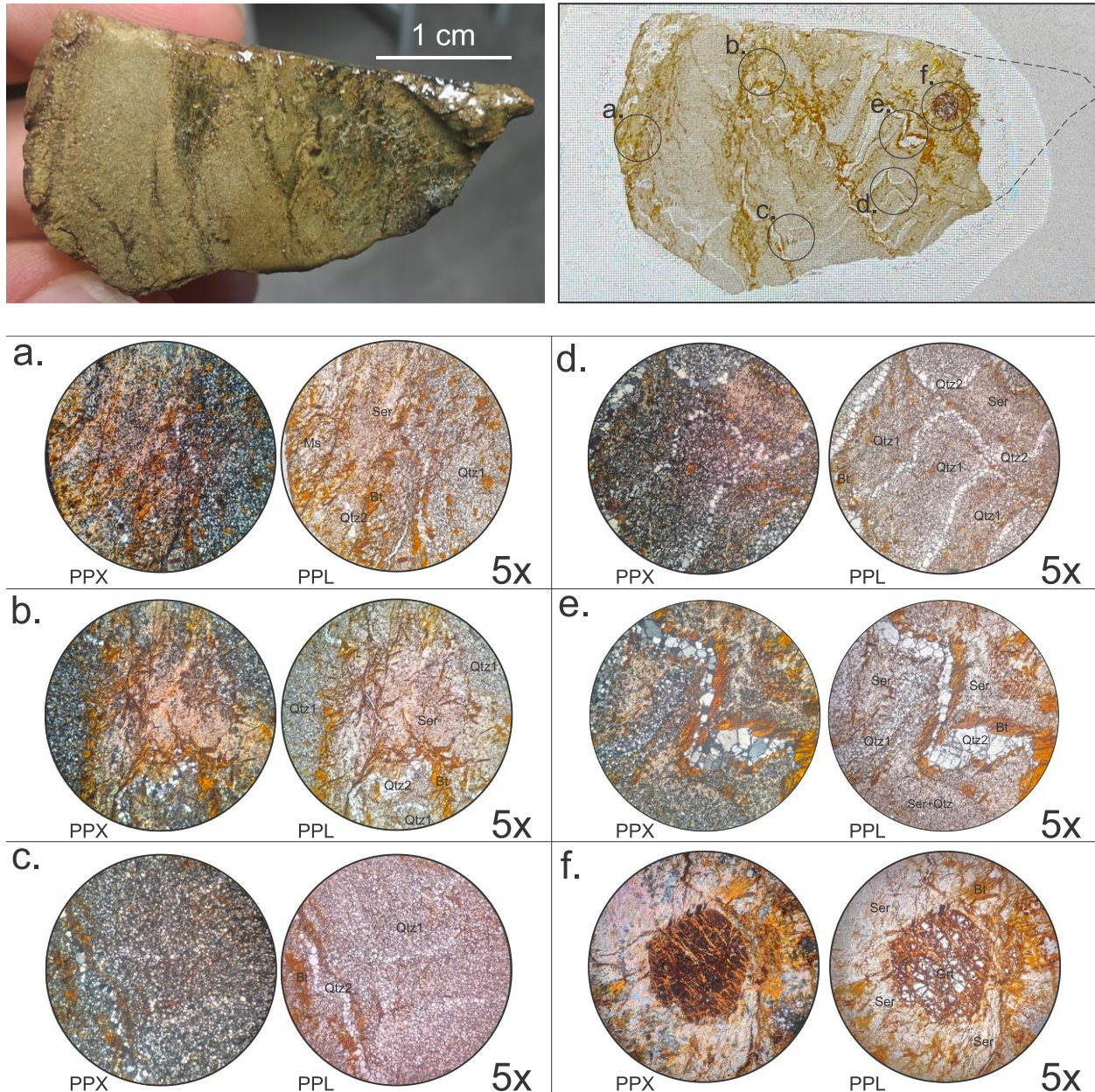
Nota. En la parte superior se muestra el clasto CLA-01 con su sección delgada señalando donde se encuentran ubicadas las evidencias mostradas. En a. se muestra un granate aplastado sufriendo cloritización mientras está rodeado de cuarzo con diferentes evidencias señaladas en la imagen:

cuarzo recristalizado, cuarzo con extinciones ondulosas, cuarzo con una matriz heterogénea y fina; en b. se muestra una zona con abundancia de cuarzos recristalizados; en c. el desarrollo de cuarzo con una matriz fina y clastos heterogéneos; en d. se ve un cristal fragmentado y al mismo tiempo en su red cristalina presenta desarrollo de matriz; en e. se muestra parte del relleno que le hizo la matriz al clasto donde observa que su composición es principalmente arcillosa con algunos clastos de cuarzo que permiten ver una orientación de manera horizontal o subhorizontal; y en f. se muestra un mineral opaco de habito y agregados cúbicos que por su coloración rojiza se propone sea un óxido de hierro.

La petrografía del clasto CLA-12 muestra que su composición es principalmente de cuarzo acompañado de biotita, moscovita y granate, por lo tanto, se le caracteriza como una cuarcita bimicácea con granate, particularmente de un extremo hacia el centro se encuentra alterado, y la parte menos alterada del clasto no pudo pegarse al portaobjetos como se muestra en la figura 28 debido a las condiciones generales de cohesión del clasto, en ella se observa que se manifiesta un cuarzo primario de tamaños finos y un cuarzo secundario de tamaños más gruesos que se encuentra dispuesto a manera de venillas sinuosas por toda la muestra (relacionado a un evento hidrotermal), aquí se puede observar un evento de deformación frágil acompañado de un evento hidrotermal que fomenta la cloritización ya que sus los minerales hojosos y el granate se encuentran alterando a clorita sumado de sericita y minerales opacos, mostrando dichas características en la figura 26.

Figura 26

Petrografía del clasto CLA-12



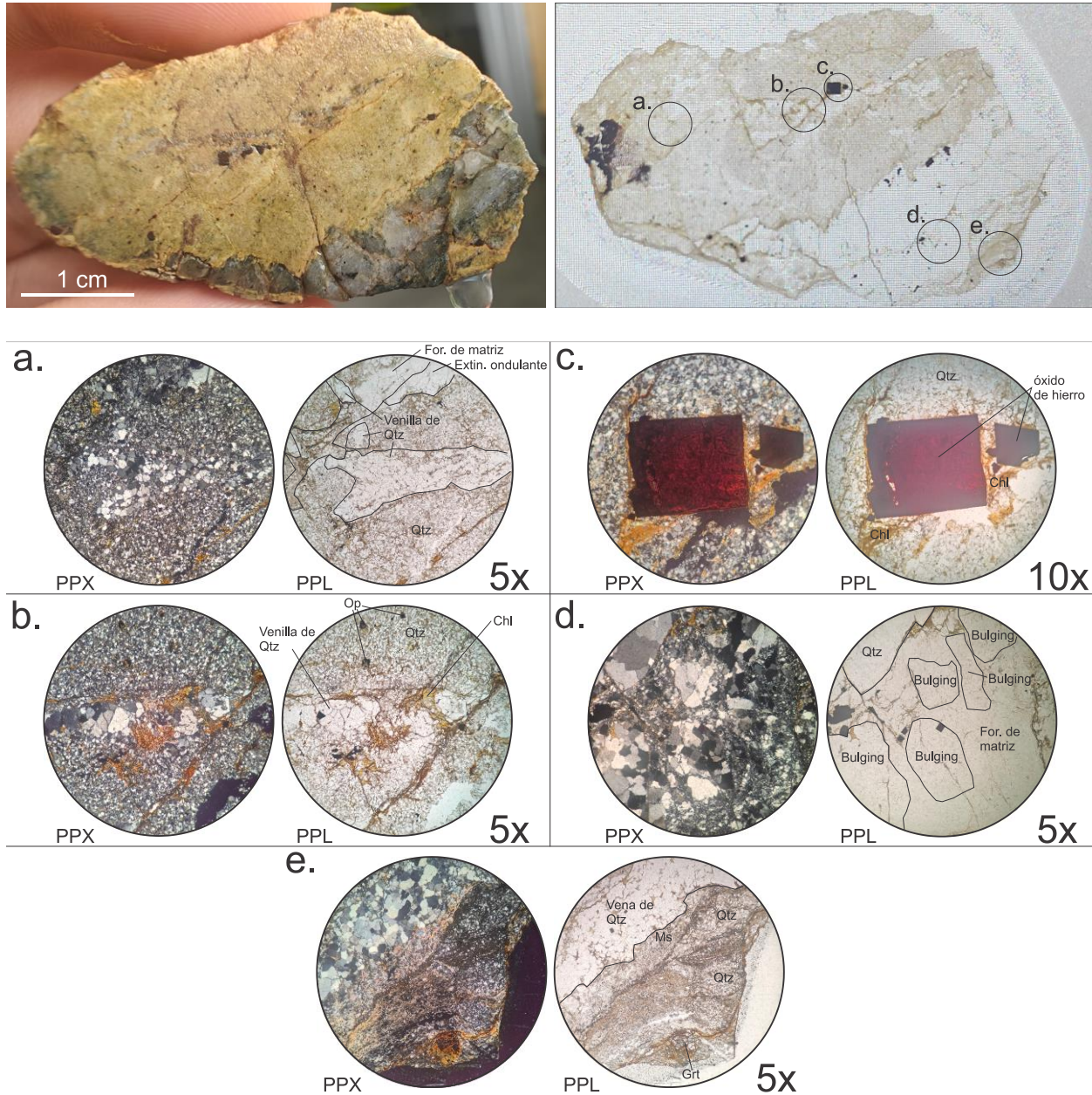
Nota. En la parte superior se muestra el clasto CLA-12 con su sección delgada señalando donde se encuentran ubicadas las evidencias mostradas. En a. se muestra el cuarzo 1 de tamaño fino, el cuarzo 2 de tamaño más grueso, biotita, moscovita y sericita, con la presencia de algunas fracturas;

en b. se muestra principalmente la presencia de la sericita con biotita en el centro, en las partes externas el cuarzo 1 y en la parte inferior el cuarzo 2; en c. se muestra principalmente el cuarzo 1 y en la parte izquierda el cuarzo 2 con biotita; en d. se resalta el aspecto del cuarzo 2 junto con el cuarzo 1 y presencia de biotita; en e. se muestra el cuarzo 2 rodeado de biotita y a su alrededor abundante presencia de sericita y presencia del cuarzo 1; y en f. se muestra la presencia de granate fracturado y con procesos de cloritización, estando rodeado por abundante sericita y se presenta también la biotita sumado de minerales opacos.

La petrografía del clasto CLA-16 muestra que su composición es principalmente de cuarzo el cual en la parte superior presenta un tamaño fino dándole un aspecto amarillento y granular a la muestra de mano, acompañado de biotita, moscovita y granate, por lo tanto, se le caracteriza como un esquisto bimicáceo con granate, en dicha zona se observa la presencia de venillas de cuarzo con tamaños de cristales de mayor tamaño, además se tienen diferentes materiales opacos de tamaño considerable con hábitos y agregados cúbicos a la vista del microscopio, en su zona media se tiene una vena de cuarzo con los cristales de más tamaño en la muestra y en ellos también se observan los opacos ya mencionados, asimismo se observa que el clasto sufrió un evento de recristalización, posteriormente un evento de deformación frágil acompañado de un evento hidrotermal y cloritización ya que sus minerales hojosos y el granate se encuentran alterando a clorita sumado de minerales opacos, mostrando dichas características en la figura 27.

Figura 27

Petrografía del clasto CLA-16



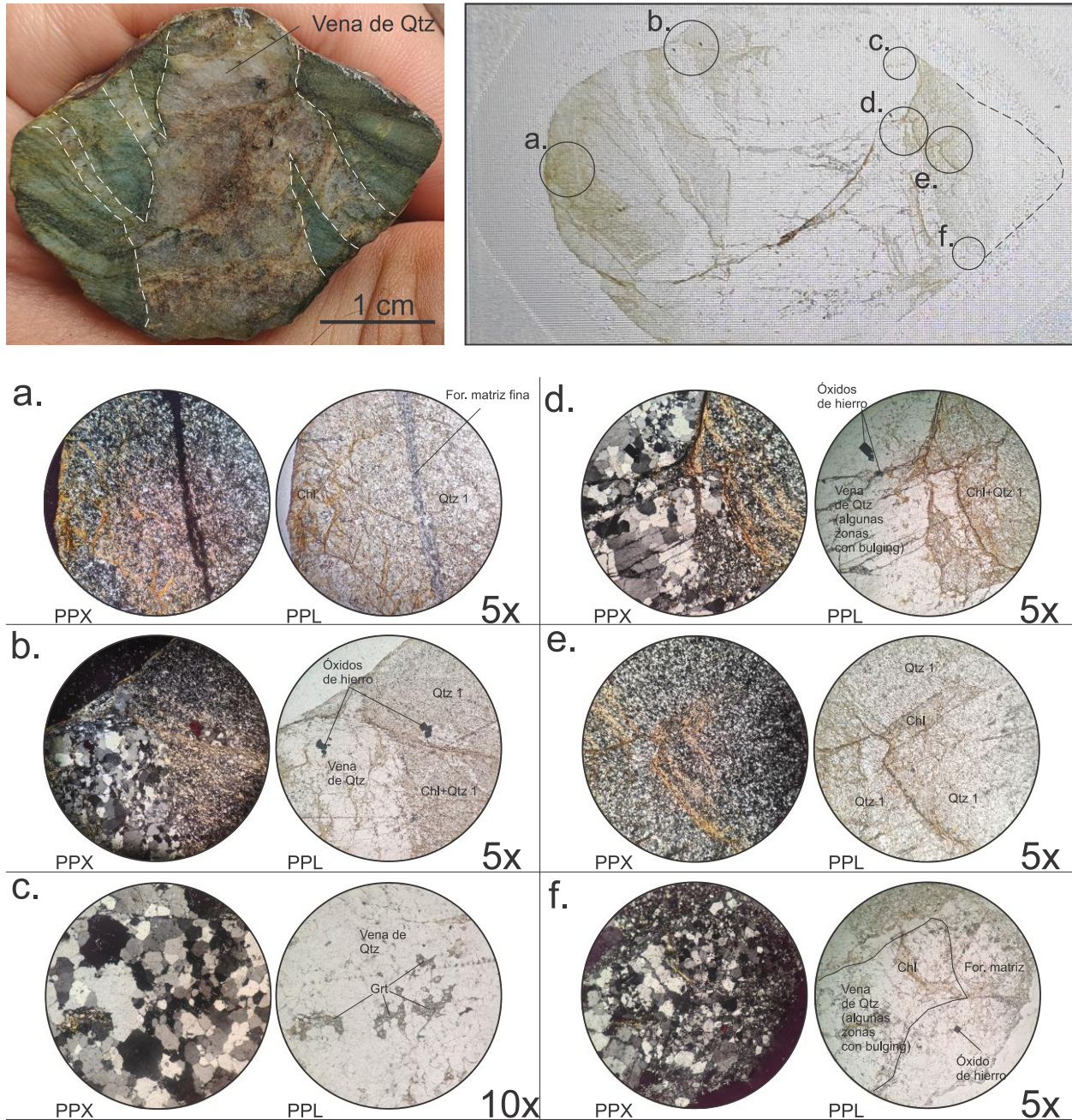
Nota. En la parte superior se muestra el clasto CLA-16 con su sección delgada señalando donde se encuentran ubicadas las evidencias mostradas. En a. se muestra la presencia de venillas de cuarzo, el cuarzo de tamaño fino, además la formación de matriz heterogénea y angulosa sumado

de un cuarzo con extinción ondulante; en b, se muestra otra venilla de cuarzo fracturada y sus fracturas rellenas de material clorítico, todo esto rodeado del cuarzo de tamaño fino y ocasionalmente minerales opacos; en c. se resalta la morfología de los óxidos de hierro que también se encuentran fracturados y rellenos con material clorítico, todo esto rodeado del cuarzo de tamaño fino; en d. se observa el estado de los cristales en la vena de cuarzo, allí se observan procesos de recristalización inicial mediante el bulging y el fracturamiento posterior donde se desarrolla una matriz heterogénea y angulosa; y en e. se muestra principalmente la presencia de granate y moscovita que están siendo cloritizados, acompañados del cuarzo de tamaño fino y algunas fracturas, siendo esta la evidencia de la procedencia metamórfica del clasto, estando en contacto con la vena de cuarzo.

La petrografía del clasto CLA-28 muestra que su composición es principalmente de cuarzo de tamaño fino acompañado de granate, por lo tanto, se le caracteriza como una cuarcita con granate, presenta una vena de cuarzo de con cristales de mayor tamaño (de origen hidrotermal) que corta por la mitad del clasto y en ella se encuentran restos de granate parcialmente fundidos y con cloritización, además, dispersos por la muestra se presentan opacos con hábitos y agregados de morfologías cúbicas de óxidos de hierro y otros opacos de tamaño más pequeño y de manera más redondeada, por último, se observa que el clasto sufrió un evento de recristalización, posteriormente un evento de deformación frágil acompañado de un evento hidrotermal y cloritización ya que el fracturamiento fomentó el desarrollo de clorita secundaria en abundancia, lo cual, le da la coloración verdosa que se observa en muestra de mano y el granate, asimismo, se encuentra alterando a clorita, mostrando dichas características en la figura 28.

Figura 28

Petrografía del clasto CLA-28



Nota. En la parte superior se muestra el clasto CLA-16 con su sección delgada señalando donde se encuentran ubicadas las evidencias mostradas. En a. se muestra un cuarzo 1 de tamaño fino, y

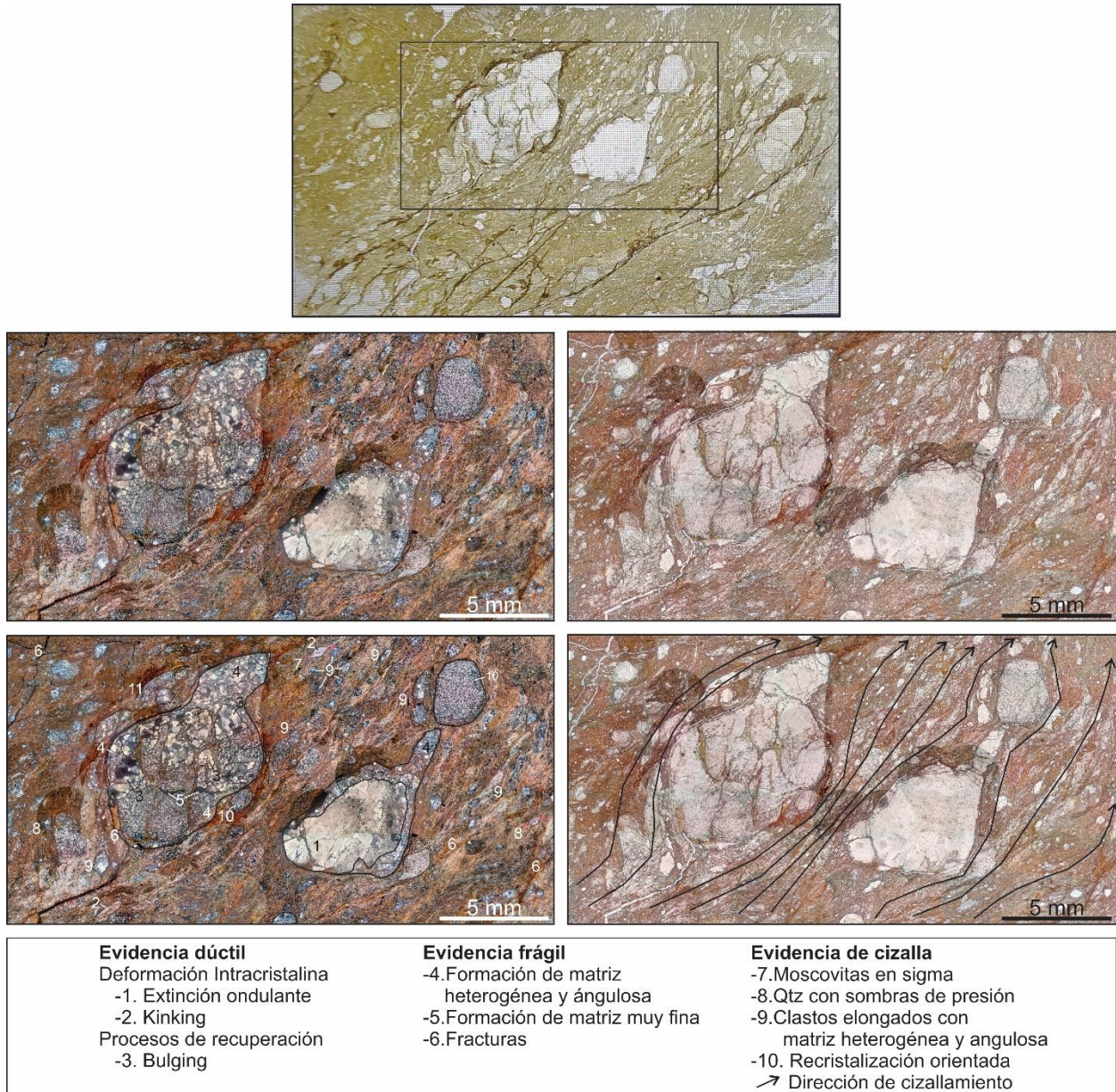
la presencia de diferentes fracturas que han sido rellenadas abundantemente con material clorítico sumado a la formación de una matriz muy fina que atraviesa de lado a lado la microfotografía; en b. se resalta la presencia del cuarzo 1 de tamaño fino, y la presencia de clorita en la parte inferior derecha y la misma rellenando fracturas, todo lo anterior en contacto con el cuarzo 2 o el cuarzo de la vena hidrotermal, de mucho mayor tamaño de cristal, y con desarrollo de óxidos de hierro de habito y agregado cúbico; en c. se resalta la presencia de granate siendo parcialmente fusionado con la vena de cuarzo de carácter hidrotermal, y al mismo tiempo, presentando alteración clorítica; en d. se observa la presencia del cuarzo 1 en contacto con el cuarzo hidrotermal, el cual presenta evidencias de bulging, y el desarrollo de óxidos de hierro de habito cúbico, todo lo anterior se encuentra afectado por fracturamiento que ha sido rellenado por clorita; en f. se enfoca la vena de cuarzo hidrotermal que en algunos lugares está desarrollando sus primeras etapas por recristalización mediante bulging y alrededor el desarrollo de una matriz heterogénea y angulosa, presentando fracturas rellenas de clorita.

Ahora, terminadas las descripciones petrográficas de los clastos, se realizan los análisis petrográficos de las muestras representativas del afloramiento, una sección para MTZ-01, y dos secciones para MTZ-02 (codificadas como MTZ-02-01 y MTZ-02-02). Para MTZ-01 se observa que la composición de su matriz es principalmente un material arcilloso muy fino (que aún por este método no es posible caracterizar) y sericitico; presenta clastos elongados en una dirección preferencial con las composiciones presentadas anteriormente en el documento, donde el componente principal es el cuarzo y en menor proporción se pueden encontrar moscovitas, biotitas, cloritas y algunos opacos, aquí se hacen notorios varios de los mecanismos de deformación

propuestos por Passchier (2005), donde se destacan mecanismos de deformación de carácter frágiles, dúctiles y de cizalla, todos presentados de manera clara a continuación en la figura 29.

Figura 29

Mosaico de microfotografías de la muestra MTZ-01



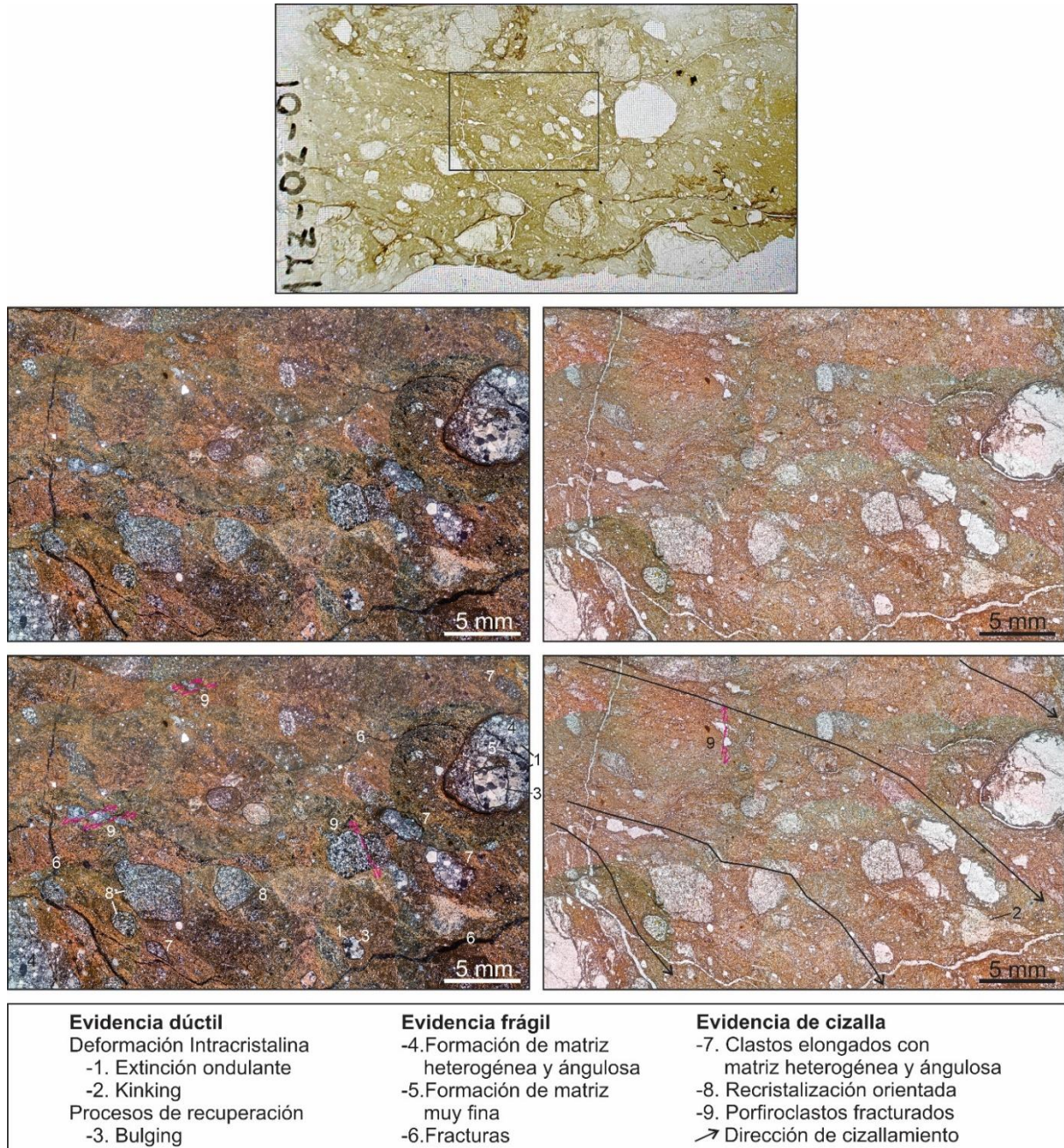
Nota. En la parte superior se presenta la sección delgada señalando donde se tomó la microfotografía, debajo se muestran los mosaicos en PPX (izquierda) y PPL (derecha) un par sin

interpretación, y el par inferior interpretado, con la intención de que puedan ser comparadas, y por último se presenta un cuadro de convenciones con los mecanismos de deformación identificados en la sección, clasificados según su naturaleza (frágil, dúctil o de cizalla).

Para MTZ-02 se realizaron dos secciones delgadas Mtz-02-01 y Mtz-02-02 en ellas se observa que al igual que la muestra anterior (Mtz-01) su composición es principalmente arcillosa y sericitica, con clastos elongados en una dirección preferencial, compuestos principalmente de cuarzo y en menor proporción moscovitas, biotitas, cloritas y algunos opacos asimismo, continúan siendo notorios algunos de los mecanismos de deformación propuestos por Passchier (2005), donde se destacan mecanismos de deformación de carácter frágiles, dúctiles y de cizalla, todos presentados de manera clara a continuación en las figuras 30, 31 y 32, además, se encuentra que en la muestra Mtz-02-02 se presenta granate completamente deformado y cizallado.

Figura 30

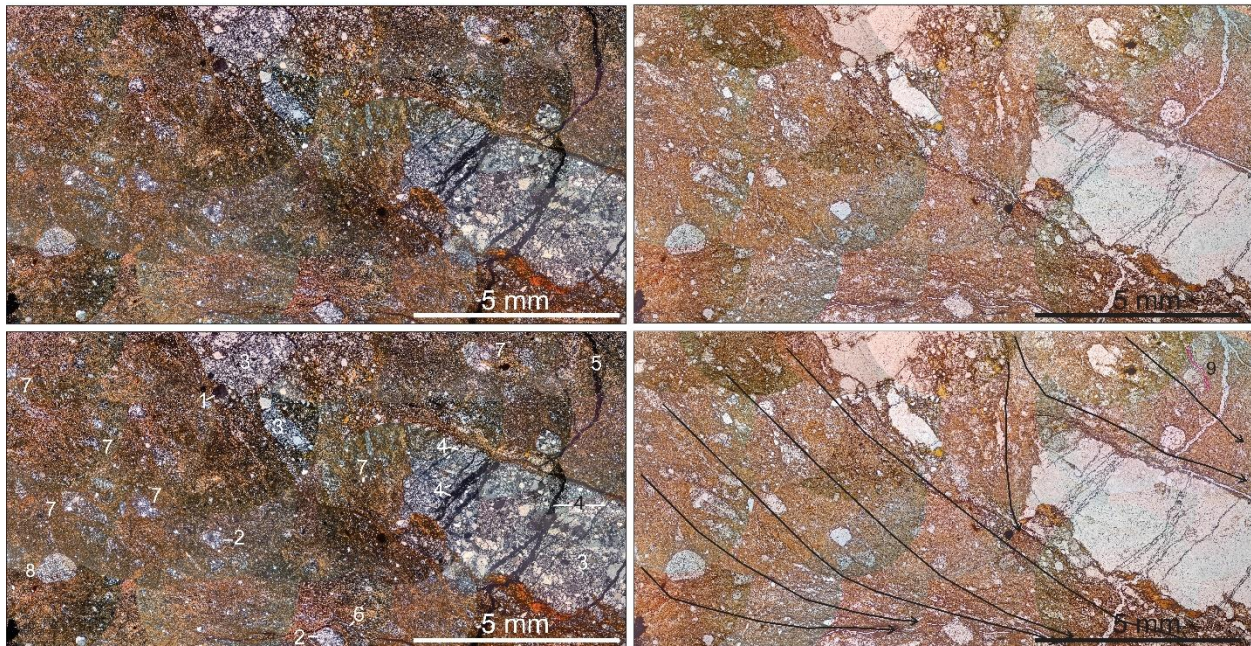
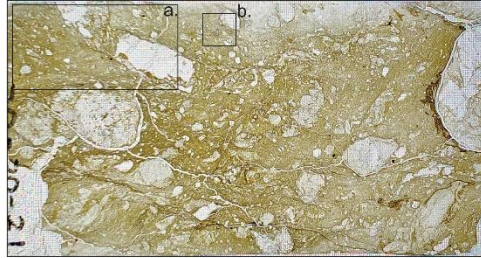
Mosaico de microfotografías de la muestra Mtz-02-01



Nota. En la parte superior se presenta la sección delgada señalando donde se tomó la microfotografía, debajo de esta los mosaicos en PPX (izquierda) y PPL (derecha) un par sin interpretación, y el par inferior interpretado, para que puedan ser comparados.

Figura 31

Mosaico de microfotografías de la muestra MTZ-02-02 recuadro a

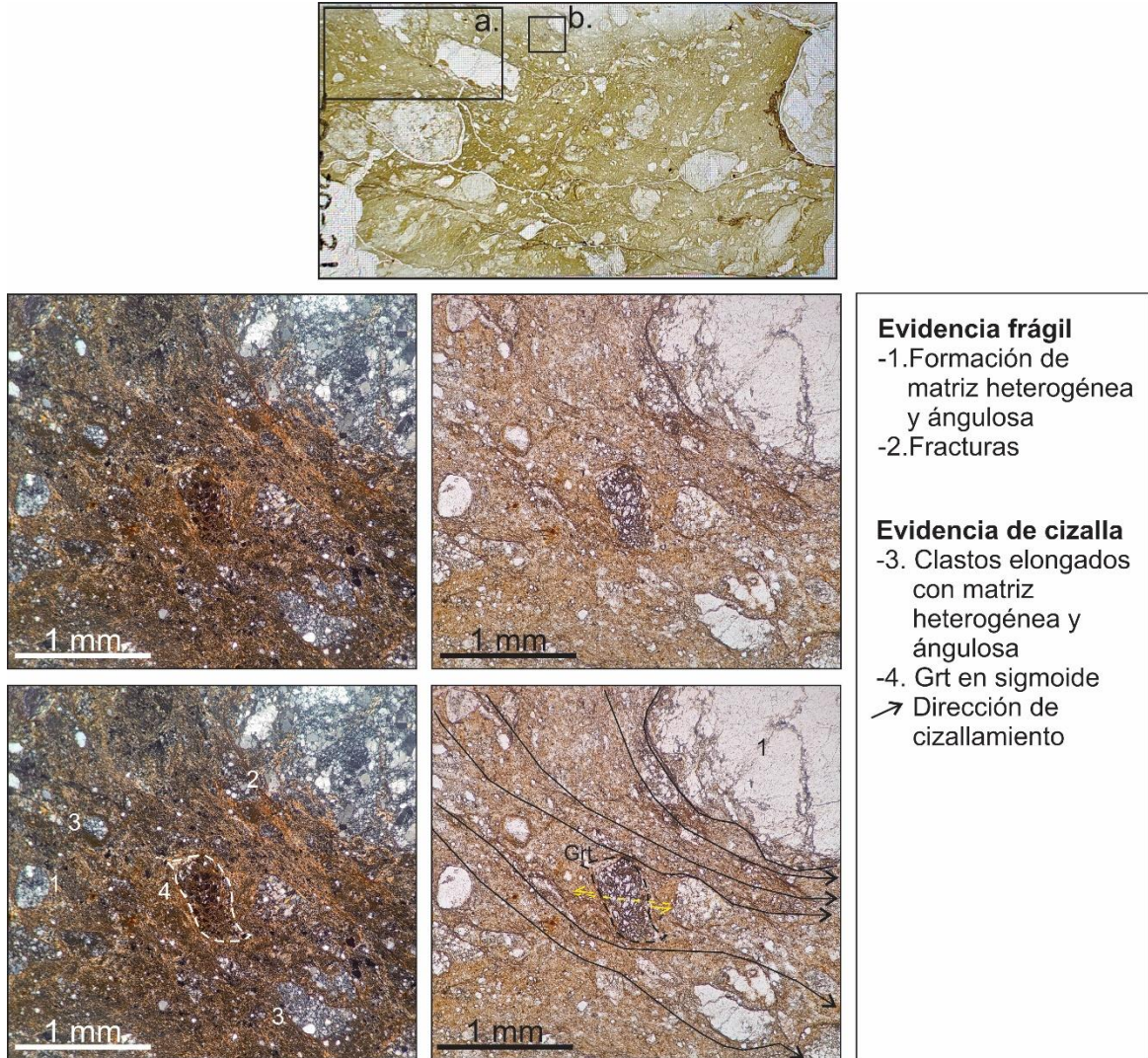


Evidencia dúctil	Evidencia frágil	Evidencia de cizalla
Deformación Intracristalina	-3. Formación de matriz heterogénea y ángulosa	-6. Clastos en sigma
-1. Extinción ondulante	-4. Formación de matriz muy fina	-7. Clastos elongados con matriz heterogénea y ángulosa
Procesos de recuperación	-5. Fracturas	-8. Recristalización orientada
-2. Bulging		-9. Porfiroclastos fracturados
		↗ Dirección de cizallamiento

Nota. En la parte superior se presenta la sección delgada mostrando el recuadro “a” donde se tomó la microfotografía, en la parte inferior se encuentran los mosaicos en PPX (a la izquierda) y PPL (a la derecha) un par sin interpretación, y el par inferior interpretado, para que puedan ser comparadas.

Figura 32

Microfotografía de la muestra Mtz-02-02 recuadro b



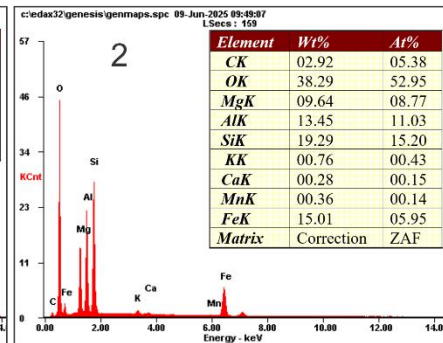
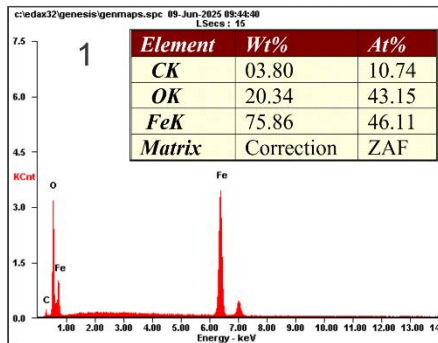
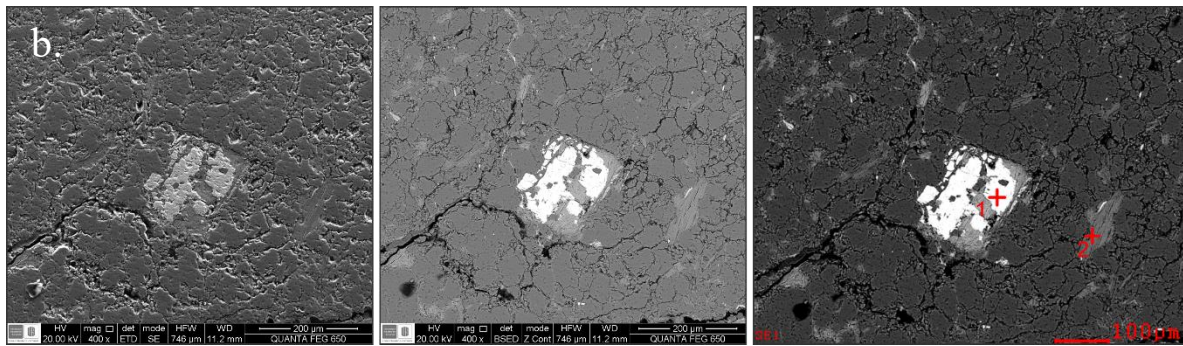
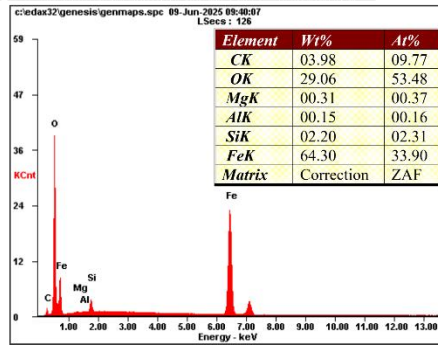
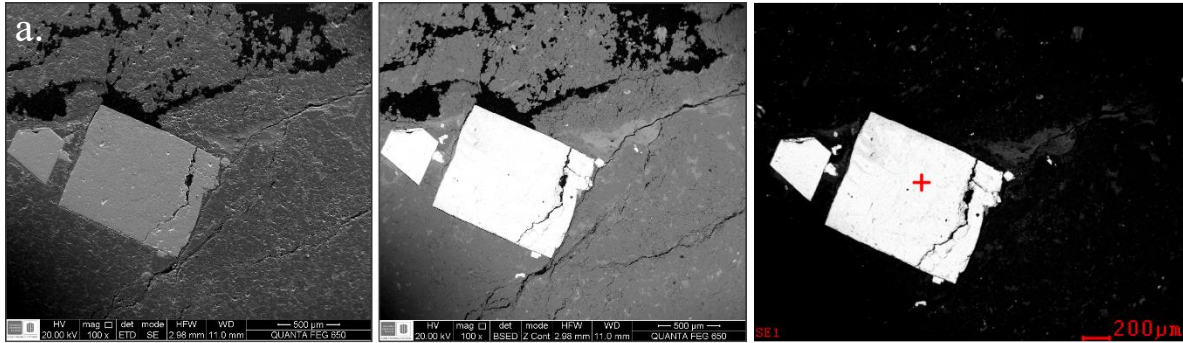
Nota. En la parte superior se presenta la sección delgada mostrando el recuadro “b” donde se tomó la microfotografía, debajo, los mosaicos en PPX (izquierda) y PPL (derecha) un par sin interpretación, y el par inferior interpretado, para que puedan ser comparadas. Se resalta la presencia de granate dentro de la matriz, con un aspecto deformado y cizallado a manera sigmoidal, mostrando un movimiento sinestral de la cizalla (movimiento relativo ya que las muestras no se encuentran orientadas) estando en concordancia con la dirección principal de la cizalla.

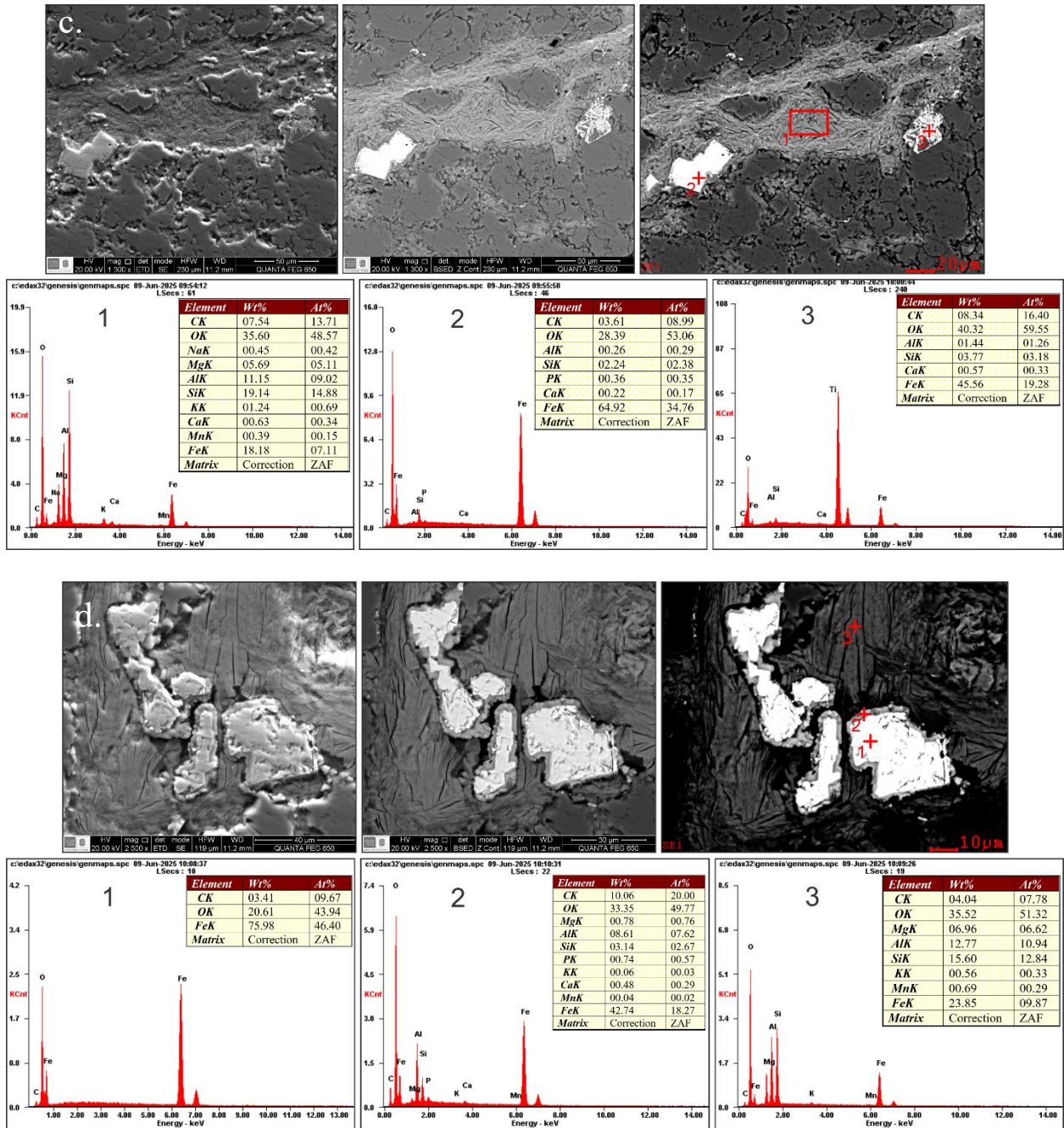
5.4. Microscopia electrónica de barrido

Se utilizó esta técnica en las muestras de clastos CLA-16, CLA-17 y de matriz MTZ-01 para identificar los minerales opacos, especies minerales adicionales y clasificar el material que compone la matriz, encontrando que dentro de los minerales opacos están presentes: magnetitas (Fe_3O_4), con morfologías geométricas cuadradas, en algunos casos fracturadas, y con algunos bordes de reacción (figura 33, 35, 37); piritas (FeS_2), con morfologías no geométricas, sino alteradas y/o corroídas (figura 35); y rutilos (TiO_2) con texturas esqueléticas, corroídas, fracturadas y en algunos casos de manera subhedral y con impurezas de hierro (Fe) (figuras 33c, 38). Dentro del material arcilloso se encontró una firma relacionada a esmética (figura 36) según Welton, (1984). Como mineral adicional se confirma que el material que esta relleno las fracturas es clorita (figuras 33c, 33d), también, se tiene que los granates pertenecen a la serie espesartina-almandino, estando alterados lo que aumenta su contenido en calcio (figura 34). Todo esto mostrado a continuación en las figuras 33, 34, 35, 36, 37 y 38.

Figura 33

Aspecto de magnetitas observados al SEM en muestras de clasto (CLA-16)



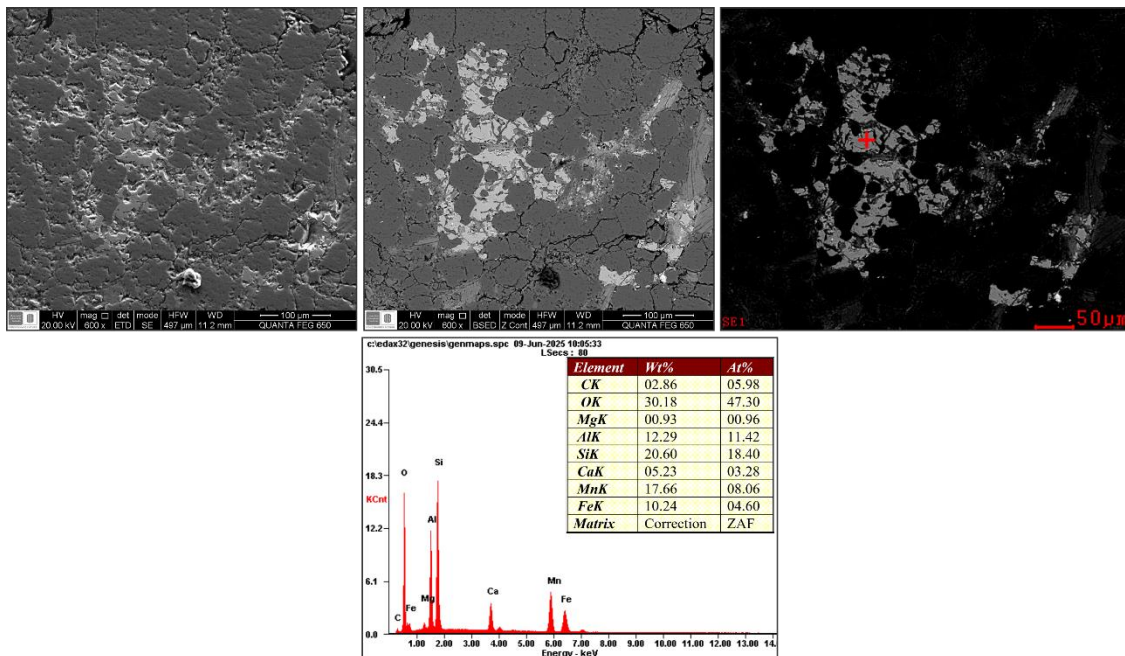


Nota. Se presentan los resultados del SEM con una imagen ETD para electrones secundarios, BSED para electrones retrodispersados, una imagen señalando el ensayo EDS y la información semicuantitativa de los elementos químicos. En a. se muestra una magnetita de gran tamaño, acompañada de una más pequeña, ambas con su hábito desarrollado y con fracturas, el material

que las rodea es cuarzo; en b. 1. Una magnetita fracturada y corroída, rodeada de cuarzo, en 2. Una clorita también rodeada de cuarzo; en c. se muestra una fractura rellena, 1. Clorita como material que esta relleno de la fractura, 2. Magnetitas dentro de la fractura con hábitos bien desarrollados, 3. rutilo con textura esquelética; en d. 1. Se encuentran magnetitas, con un buen desarrollo de su hábito en manera cúbica, 2. Muestra un borde de reacción de la magnetita con diferentes especies químicas en su espectro, lo que dificulta su identificación, 3. Se identifica clorita, la cual, está rodeando la magnetita, situación que fomenta el desarrollo de dicho borde de reacción en la magnetita.

Figura 34

Aspecto de granate observado al SEM en muestras de clasto (CLA-16)

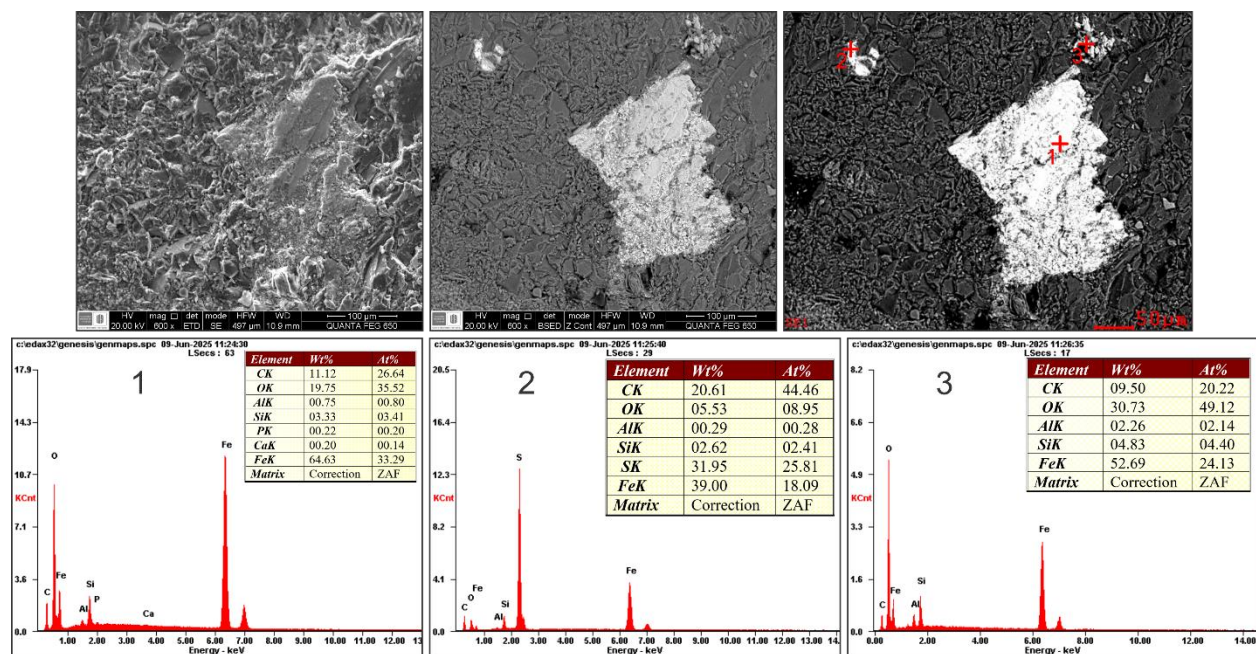


Nota. Se presentan los resultados del SEM con una imagen ETD para electrones secundarios, BSED para electrones retrodispersados, una imagen señalando el ensayo EDS y la información

semicuantitativa de los elementos químicos. Se detecta un granate perteneciente al grupo espesartina-almandino (rico en Mn y Fe respectivamente) con indicios de alteración, lo que puede explicar su contenido en calcio, y su morfología esquelética o corroída.

Figura 35

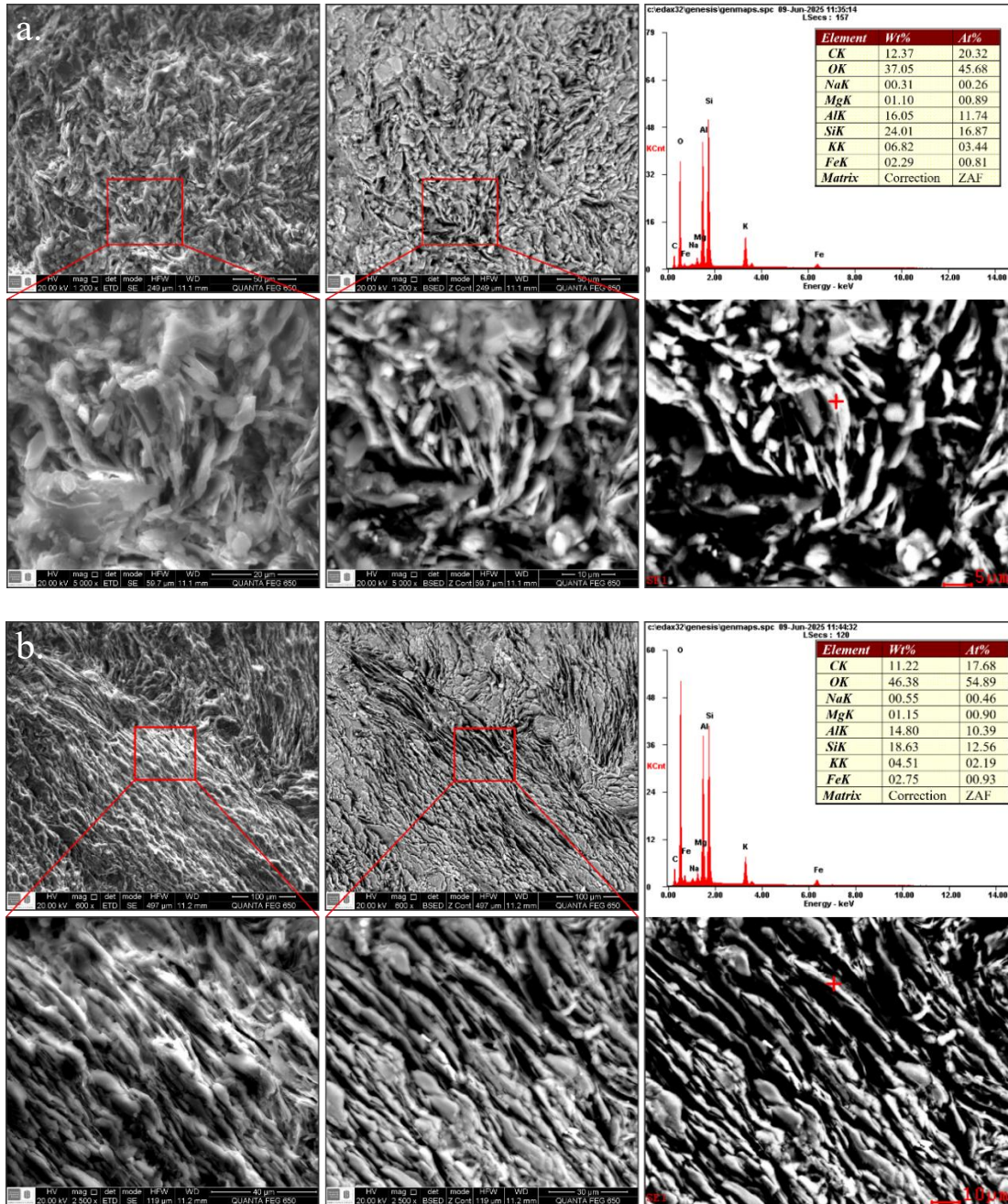
Aspecto de magnetitas y pirita observados al SEM en muestras de clasto (CLA-17)



Nota. Se presentan los resultados del SEM con una imagen ETD para electrones secundarios, BSED para electrones retrodispersados, una imagen señalando el ensayo EDS, y la información semicuantitativa de los elementos químicos. Se encuentran dos cristales de magnetita 1 y 3, de manera fracturada y pirita en 2 sin el desarrollo geométrico de su hábito, ambas especies minerales están rodeadas de cuarzo.

Figura 36

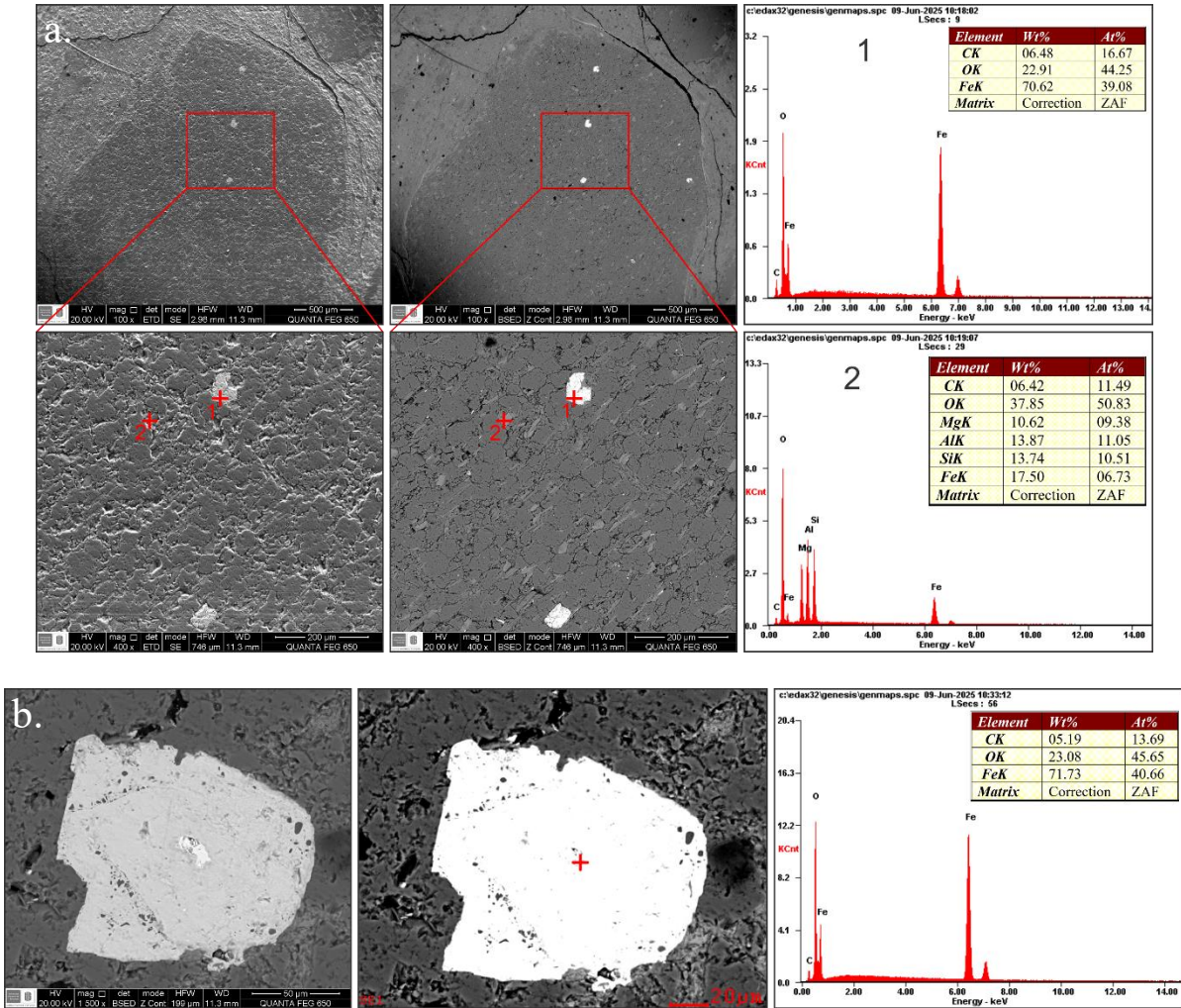
Aspecto de minerales arcillosos observados al SEM en muestras de clasto (CLA-17)



Nota. Se presentan los resultados del SEM con una imagen ETD para electrones secundarios, BSED para electrones retrodispersados, una imagen señalando el ensayo EDS, y la información semicuantitativa de los elementos químicos. En a. y b. se identifica especialmente esmectita.

Figura 37

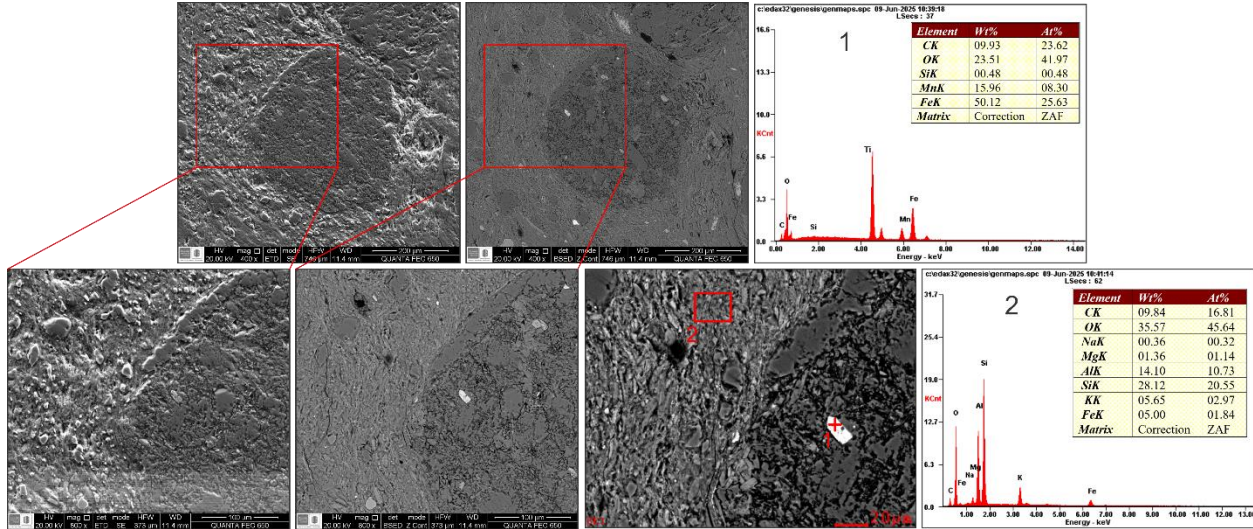
Aspecto de magnetitas dentro de los clastos observados al SEM en muestras de matriz (MTZ-01)



Nota. Se presentan los resultados del SEM. En a. se tiene una imagen ETD para electrones secundarios, BSED para electrones retrodispersados donde se muestra el ensayo EDS, y la información semicuantitativa de los elementos químicos. Se observó al interior de un clasto encontrando magnetita en a.1. y clorita en a.2. En b. se tiene una imagen BSED para electrones retrodispersados y una imagen señalando el ensayo EDS, encontrando un cristal de magnetita de aspecto corroído.

Figura 38

Relación entre matriz y clasto observado al SEM en muestra de matriz (MTZ-01)



Nota. Se presentan los resultados del SEM con una imagen ETD para electrones secundarios, BSED para electrones retrodispersados, una imagen señalando el ensayo EDS, y la información semicuantitativa de los elementos químicos. Se muestra la intersección entre clasto (gris oscuro) y la matriz (gris claro), observando como el material de la matriz presenta una dirección de flujo que envuelve a los clastos presentes y una composición asociada a esmectita mostrada en 2; encontrando dentro del clasto una firma química asociada a rutilo en 1.

6. Discusión

Recientemente se observaron rocas que suprayacen los Esquistos del Chicamocha en cercanías a Panachi, estas, presentan una textura que no corresponde al espectro de eventos que formaron las rocas metamórficas que tuvieron lugar en la zona a lo largo del tiempo, sino que, por dicho aspecto textural se relacionaron en un primer momento a posibles procesos sedimentarios, idea que pudo estar soportada por los aportes de Reynozo & Turizo (2024) quienes manifiestan la

presencia de metaconglomerados ubicados en la Quebrada La Tinta y la Quebrada Los Totumos (al sur del área de estudio), sin embargo, a la luz de los resultados del presente estudio se puede decir que:

Dentro de los clastos conglomeráticos se encuentran variedades polimícticas, donde sobresalen cuarzos, riolitas y en menor proporción clastos metamórficos con y sin procesos de alteración, esto indica que posterior a la formación de los Esquistos del Chicamocha, se dio la intrusión de riolitas (que pueden ser correlacionadas al pulso magmático que dio origen a las Metariolitas de Onzaga hace unos 450 Ma) y acompañado de este proceso se dio la formación de una segunda generación de cuarzo de origen hidrotermal en forma de venas que transportó algunos minerales metálicos como magnetitas y pirritas; una vez teniendo esta configuración de litologías se puede decir que la zona sufrió 4 eventos deformativos descritos a continuación (mostrados en la figura 39):

Primer evento deformativo metamórfico: Es de carácter dúctil y solo se encuentra registrado dentro de los clastos de altas composiciones en cuarzo que están inmersos en la matriz, se preservaron en ellos texturas con extinción ondulante, bulging, kinking y recristalización orientada, indicando que las rocas estuvieron sometidas a temperaturas aproximadas de 350°C, y en consecuencia, generando un metamorfismo de muy bajo grado, asociadas a un evento dinamo-térmico posterior al Famatiniano principal que dio origen a los Esquistos del Chicamocha, correlacionándolo entonces a los eventos metamórficos posteriores (eventos fammatinianos menores) mencionados por Mantilla *et al.*, (2016 a, b) para la zona de estudio.

Segundo evento deformativo: Para este evento se requiere buscar un mecanismo que propicie la formación de un volumen de roca fragmentada, en la que se encuentre principalmente

tamaños de partículas finas y en ellas los fragmentos de tamaño guijas observados, por lo tanto, se da la necesidad de la presencia de fricción, rasgo que está presente en un ambiente de deformación frágil, entonces se precisa que este segundo evento es de carácter frágil, y facilitó en un primer momento la deformación intraformacional en los Esquistos del Chicamocha, ya que se encontraron clastos de cuarcíticas con granate, clastos de esquistos bimicáceos con granate, además, los clastos con alteración resultaron también ser metamórficos, y asimismo se observó granate de manera aislada flotando en el material de tamaño fino, a esto se suma el hallazgo de clastos de cuarzo hidrotermal y clastos riolíticos, lo que significa que los clastos son de origen autóctono, descartando que hayan sufrido algún tipo de transporte y depositación; por otro lado, otras evidencias de este evento es el desarrollo parcial y/o total de una matriz angular y de tamaños heterogéneos dentro de los clastos conglomeráticos sobreimponiéndose a los eventos dúctiles que habían sufrido en la etapa deformativa anterior, y al mismo tiempo hubo zonas dentro de esos clastos donde también se desarrolló una matriz muy fina producto de la trituración de los clastos, sin olvidar la presencia de fracturas; de manera que, todas las evidencias apuntan a que se tratase estadio de deformación frágil, que formó, en un primer momento rocas cataclásticas.

Tercer evento deformacional: una vez formada la cataclasita, con un volumen de roca de material disgregado principalmente con fragmentos de tamaño fino y en menor proporción fragmentos de tamaños conglomeráticos, se dio la formación de diferentes estructuras como: una orientación mineral preferencial de los fragmentos de menor tamaño, deformación de los clastos de mayor tamaño elongándolos en una dirección preferencial, y puliendo su superficie con el material que los rodeaba, lo cual explica el aspecto textural observado en ellos a lo largo de este trabajo, moscovitas sigmoidales, granates sigmoidales, sombras de presión en fragmentos de

cuarcos esféricos, clastos de menor tamaño elongados hasta llegar a disgregar sus cristales de forma angulosa en la matriz, clastos fragmentados y una dirección de flujo donde el material de menor tamaño envuelve al material de mayor tamaño, son evidencias de que esta etapa fue dominada por una deformación cizallante facilitada por la configuración cataclástica de un mayor volumen de fragmentos finos lo cual ayudo a mejorar la maleabilidad de la roca.

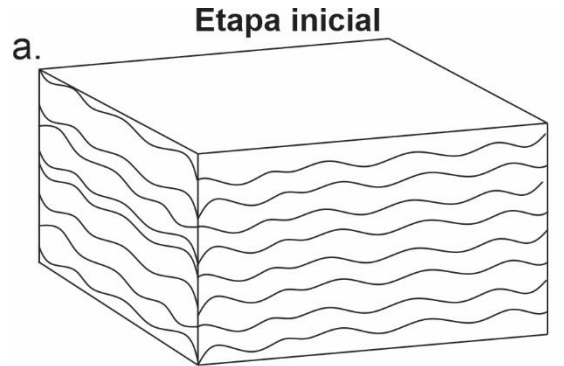
Cuarto evento deformacional: Finalmente se da un último evento de carácter frágil, que fractura las rocas del afloramiento, fragmentando algunos de los clastos antiguos, y agregando nuevo material con texturas más angulares, lo que explica la presencia en menor proporción de algunos fragmentos muy angulares encontrados, además este fracturamiento fomenta el desarrollo de alteraciones supérgenas, relleno de los espacios generados con clorita y alterando las especies minerales micáceas a sericiticas.

Figura 39

Evolución geológica de las Cataclasitas Cizalladas

Etapa inicial

Esquistos del Chicamocha

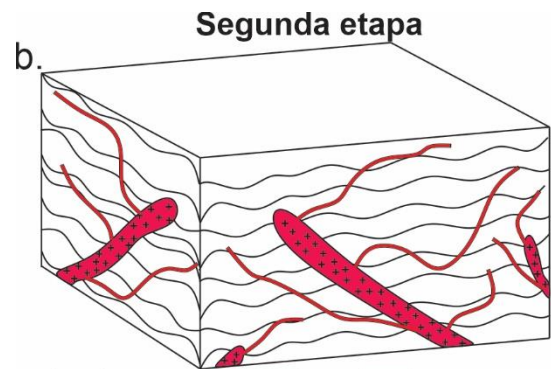


Formación Esquistos del Chicamocha
Evento Famatiniano principal ~480-470 Ma
(Ordovícico temprano a medio)

Segunda Etapa

-Emplazamiento de los cuerpos riolíticos

-Desarrollo de venas hidrotermales que transportaron metales (magnetita, pirita)



Esquistos del Chicamocha Riolita Venas hidrotermales

Emplazamiento de la riolita y formación de las venas hidrotermales pre 450 Ma (Ordovícico tardío)

Primer evento deformativo de carácter metamórfico

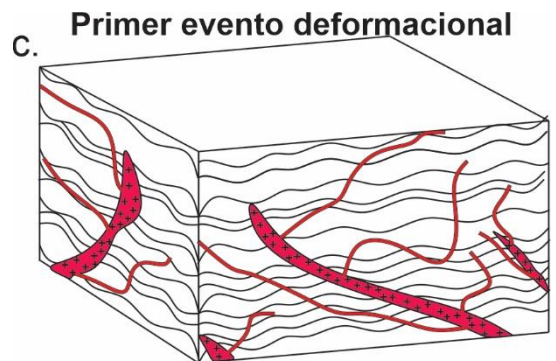
De naturaleza dúctil

Evidencias:

Presente solo en clastos de Qtz

-Extinción ondulante -Kinking -Bulging

Texturas indican que las rocas fueron sometidas a temperaturas 350°C aprox. lo que generó un metamorfismo de muy bajo grado.



Evento de carácter dúctil, asociado al evento Famatiniano menor 450 Ma. (Ordovícico tardío)

Segundo evento deformativo

De naturaleza frágil
(Fricción como mecanismo requerido)

Evidencias:

-Formación de matriz fina, en ella se encuentra inmersos:
-Grt flotante -Fragmentos de Qtz
-Material arcilloso

-Formación de fragmentos de roca de: los Esquistos del Chicamocha, riolíticos y cuarzo hidrotermal (cantos, guijas, gránulos)

-Sobreimposición de eventos frágiles sobre el evento dúctil anterior en clastos de Qtz
-Formación parcial y/o total de una matriz angular y de tamaños heterogéneos
-Formación de matriz fina

-Fracturas

Ambiente de formación <10 Km de profundidad.

La matriz se formó a partir de las rocas autóctonas de la zona de estudio. (no hay transporte de material)

Se da la formación de las **Cataclasitas**.

Tercer evento deformativo

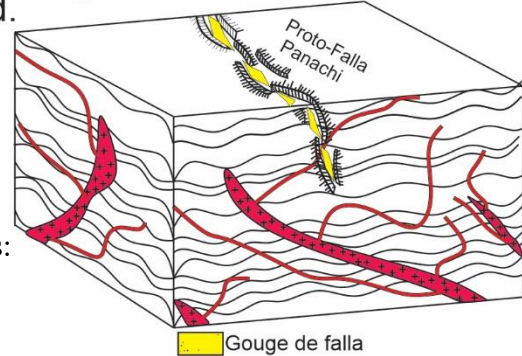
De naturaleza cizallante

Evidencias:

-En los clastos:
-Elongación de grandes clastos
-Superficies pulidas

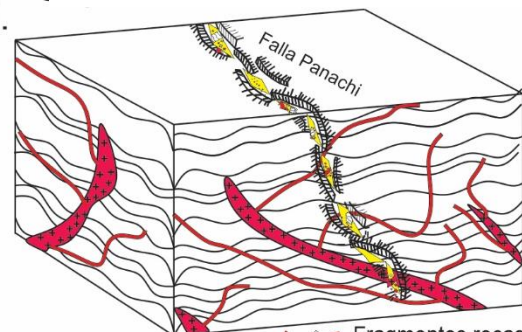
-En la matriz:
-Orientación preferencial fragmentos

d. Segundo evento deformacional



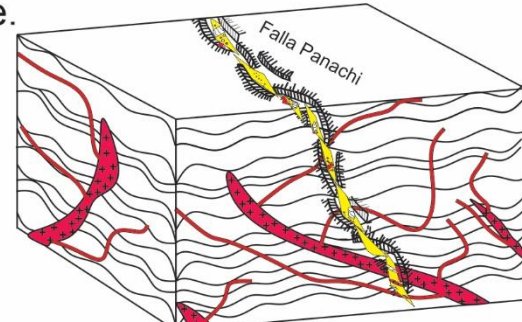
Comienzo de la deformación frágil post 450 Ma (Post-Ordovícico tardío)

d.



Profundización de la falla y formación de Cataclasitas (edad ??)

e. Tercer evento deformacional

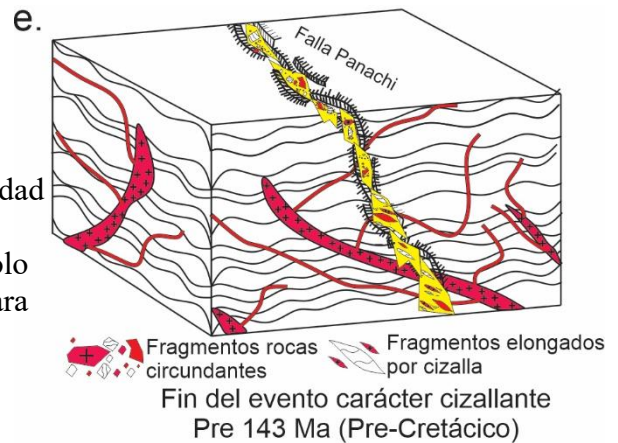


Comienzo del evento carácter cizallante, que elonga los fragmentos de la cataclasita (edad ??)

- Ms y Grt sigmoidales
- Sombras de presión
- Disgregación de fragmentos producto de la
- Clastos fragmentados
- Dirección de flujo

Ambiente de formación entre 10 – 15km de profundidad

Se da la formación de las **Cataclasitas Cizalladas** solo con el material que logró la profundidad requerida para este proceso, el material más superficial continua triturándose de manera frágil.



Cuarto evento deformativo

De naturaleza frágil

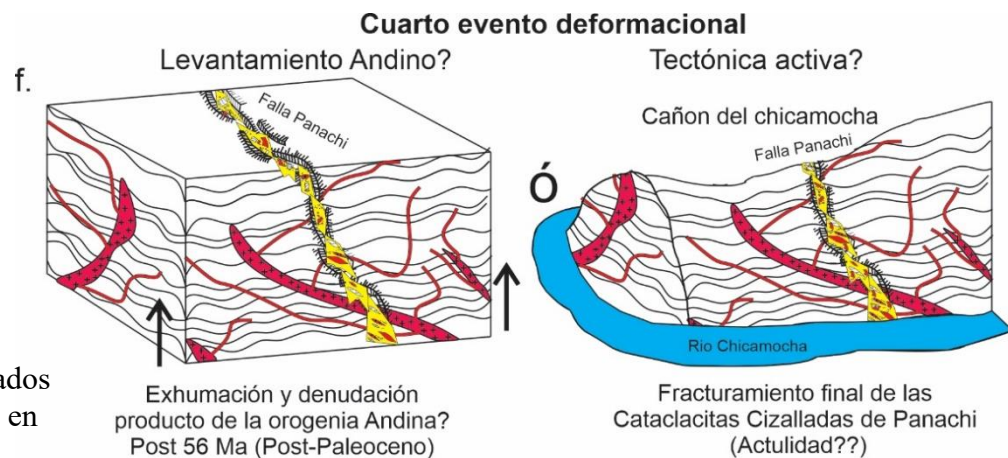
Evidencias:

- Fragmentación de material antiguo
- Incorpora nuevo material con morfologías angulosas (diferente a los clastos cizallados que fueron elongados y pulidos en la etapa anterior)

-Alteraciones supérgenas (cloritización y sericitación)

Podría ser explicado debido a la Orogenia Andina ó a la tectónica activa o inclusive a una combinación de ambas situaciones.

Nota. Se muestra de manera esquemática la evolución geológica de las rocas estudiadas.



Según las relaciones descritas anteriormente, se afirma que el primer evento deformativo de carácter dúctil hace parte de los eventos fammatinianos menores hace unos 450 Ma. (posiblemente, mismo evento que formó a las filitas de san pedro), posteriormente el segundo

evento de deformación de carácter frágil tendría un comienzo posterior a los 450 Ma, ósea, post-Ordovícico tardío ya que se encontraron clastos correlacionables al pulso magmático que dio origen a las Metariolitas de Onzaga, que se formaron en dicho plano temporal, y del mismo modo se sugiere que el tercer evento de deformación pudo darse, previo a los ~143 Ma, ósea, pre-Cretácicos, ya que en la proyección lateral de la franja de deformación no se encontró material relacionado con las rocas sedimentarias características, ni material volcanoclástico relacionado a la actividad volcánica de esa época. Y el ultimo evento deformacional podría darse en el plano temporal de la orogenia andina en respuesta al movimiento de la placa caribe por el margen NW del territorio colombiano hace unos 56 Ma. o inclusive, ser mucho más reciente y ser producto de la tectónica activa, mostrando su relación temporal a continuación en la figura 40.

Figura 40

Relación de los eventos deformativos en la historia del Macizo de Santander



Nota. Se muestra de manera esquemática la temporalidad de los eventos deformativos relacionados con los principales eventos formadores del Macizo de Santander.

Por lo tanto, las rocas objeto de estudio son el resultado de diferentes eventos deformacionales ocurridos en los Esquistos del Chicamocha y se caracterizan como las Cataclasitas Cizalladas de Panachi, con una edad máxima de 450 Ma (Ordovícico tardío) para el primer evento deformativo de carácter metamórfico, una edad >450 Ma (Post-Ordovícico tardío) y <143 Ma (pre-Cretácica) para el segundo y tercer evento deformativo que pudo generarse, intervalo temporal que puede corresponder con los eventos relacionados con la orogenia Aleghaniana (reconocida y documentada en la cordillera Central de Colombia), y un último evento deformativo que pudo generarse en la ventana de los 56 Ma a la actualidad (intervalo temporal que corresponde a la orogenia andina donde se dio un primer levantamiento significativo de la Cordillera Oriental o por tectónica activa) siendo esta una sugerencia en base a los datos observados en la investigación, sin embargo, es importante que puedan ser verificados y esclarecidos con datos geocronológicos.

6.1. Implicaciones geológicas

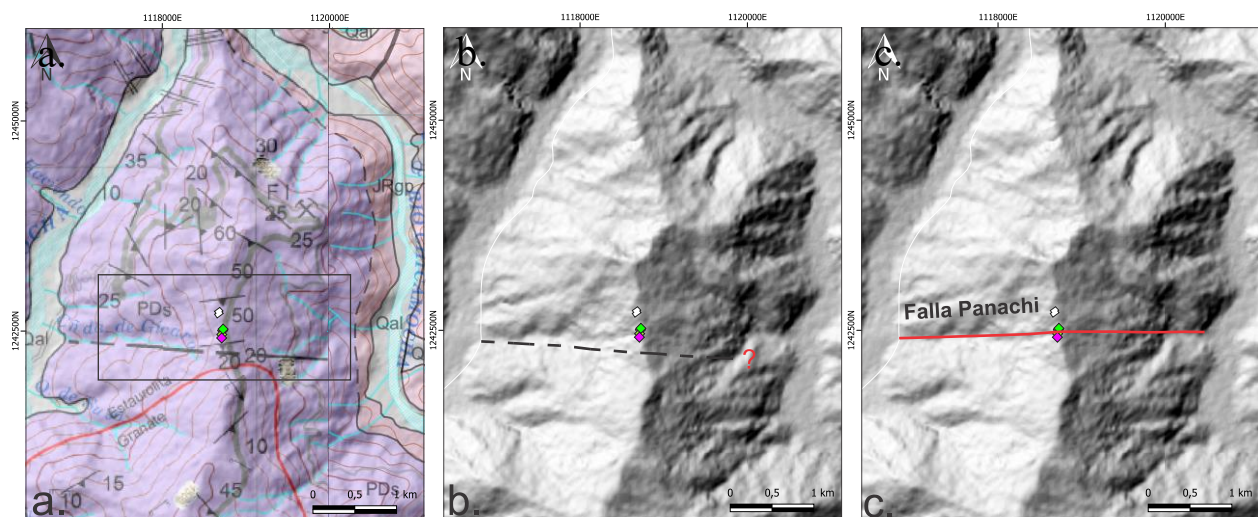
Todas la evidencias mostradas apuntan a que la formación de las rocas objeto de estudio están ligadas a 3 litologías principales y a diferentes eventos deformativos que las han moldeado con el paso del tiempo, dándoles su aspecto característico a la hora de observar el afloramiento; ahora, cuando se hace un inventario geológico de la zona se encuentra la existencia una estructura que aparece en el mapa geológico H-12 según Ward et al., (1973), como una falla geológica inferida, que no posee un trazo coherente y termina al aire, dejando en duda la veracidad de su propuesta. Con los datos del presente trabajo y una fotointerpretación (ya que no se cuenta con un dato estructural medido en campo) la estructura anteriormente mencionada pudo se reinterpretada, catalogándose como una falla existente en dirección E-W, con toda una historia deformativa que

se encontraba anteriormente oculta, tomando así relevancia para la historia geológica del cañón del Chicamocha, de manera que, en base a lo anterior se propone el nombre de falla Panachi con el objetivo de facilitar su identificación en el territorio nacional y pueda ser estudiada a profundidad posteriormente (figura 41).

Además, en consecuencia a los procesos de deformación experimentados por esta estructura, se formaron las rocas objeto de estudio, que según los datos del presente trabajo y su relación con la falla Panachi se propone reconocerlas públicamente como las Cataclacitas Cizalladas de Panachi.

Figura 41

Identificación de la falla Panachi



Nota. Se muestra la localización de la falla, los afloramientos estudiados en rombos de colores, y la ubicación Panachi en un polígono de color blanco; en a. la ubicación geográfica de la falla inferida según el mapa geológico del cuadrángulo H-12 según Ward *et al.*, (1973); en b. la falla inferida mencionada anteriormente sobre el DEM de la zona (tomado del satélite Alos Palsar con una resolución de 12.5 mts); y en c. se muestra la propuesta para falla Panachi.

7. Conclusiones

-Los clastos conglomeráticos que componen la roca objeto de estudio son de tres clases: clastos de cuarzo, clastos riolíticos y clastos metamórficos y texturalmente el 3% son gránulos (2 clastos), subangulares y esféricos; el 92% son guijas (55 clastos), 7 angulares, 17 subangulares, 22 subredondeados y 9 redondeados, con 36 esféricos y 19 no esféricos; y el 5% son cantos (3 clastos), siendo todos subredondeados, con 2 esféricos y 1 no esférico.

-Los clastos y/o fragmentos observados en la zona de daño presentan composiciones metamórficas correlacionables con los Esquistos del Chicamocha de edad de metamorfismo ~480-470 Ma (Mantilla, et al., 2016a) Ordovícico inferior; metariolíticas correlacionables con el pulso que dio origen a la Metariolita de Onzaga ~450 Ma (Rodríguez, 2022) finales del Ordovícico, y adicionalmente materiales de cuarzo y venas de cuarzo, ambas de origen hidrotermal posteriores a los eventos mencionados, siendo entonces de carácter autóctono, lo que significa que no presentan ningún tipo proceso sedimentario que implique transporte de material de otros lugares para luego ser depositado en el área estudiada.

-La rocas estudiadas son el resultado de diferentes eventos deformativos intraformacionales, que se dieron paso en la formación Esquistos del Chicamocha, allí se desarrolló primeramente un evento dúctil que produjo un metamorfismo de muy bajo grado en las rocas con mayor contenido de cuarzo, luego se dio la formación de rocas cataclásticas, en un ambiente frágil (normalmente menor a 10km de profundidad), para posteriormente ser cizalladas posiblemente en un ambiente de transición (entre los 10 y 15 km de profundidad) y finalmente ser expuestas (posiblemente gracias a la orogenia andina) y fracturadas en un último evento deformativo (que pudo ser por la misma orogenia andina ó por tectónica activa).

-Según los datos obtenidos los procesos deformativos que dieron origen a las Cataclasitas Cizalladas de Panachi pueden ser agrupadas en 2 intervalos temporales principales: >450 Ma (post-Ordovícico tardío) y <143 Ma (pre-Cretácico), franja temporal que podría asociarse a la Orogenia Aleghaniana, reconocida y documentada en la cordillera Central de Colombia; y un segundo intervalo temporal que podría ser >56 Ma y 0 Ma, intervalo temporal que podría relacionarse posiblemente con el levantamiento de la Cordillera Oriental y/o a una posible tectónica activa.

- En el área se reconocen 2 eventos de metamorfismo regional (relacionados a la Orogenia Famatiniana) y también una franja con evidencias de metamorfismo de dislocación (flujos cataclásticos y zonas de cizallamiento) que previo al presente estudio no se había reconocido.

- Se reconoce una estructura con dirección E-W que ha tenido poca atención y presenta expresiones geomorfológicas significativas en la zona, provocando cambios abruptos de pendientes e inclusive afectado el flujo normal del río Chicamocha, además de una historia deformativa con múltiples eventos, denominándose falla Panachi (en consecuencia, a su cercanía con el parque homónimo).

- Asociado a la estructura E-W se encuentra un área de daño por deformación en torno a los 150 mts de espesor, a lo largo de la cual, se encuentra una mezcla de clastos y/o fragmentos de composiciones riolíticas, metamórficas (cuarcitas y esquistos con presencia de biotita y granate) y de cuarzo hidrotermal principalmente en guijas (4 a 64 mm de tamaño) y de material subangular a subredondeado con ocasional presencia de material anguloso y redondeado, sufriendo todo lo anterior eventos deformativos dúctiles, frágiles y de cizalla, que dieron origen a las Cataclasitas Cizalladas de Panachi.

Recomendaciones

-Realizar un estudio de deformación que permita caracterizar el estado actual de la falla Panachi, entendiendo su cinemática y relacionando los resultados con el presente trabajo.

-Desarrollar un estudio microtectónico detallado con muestras del afloramiento orientadas que permitan reconocer los diversos vectores de esfuerzo que pudieron afectar la zona de estudio.

-Hacer un estudio geocronológico que permita conocer las edades de los diferentes eventos de deformación encontrados en el actual trabajo investigativo.

Referencias bibliográficas

- Aleman, A., & Ramos, V. A. (2000). The Northern Andes, Tectonic evolution of South America. (U. Cordani, E. J. Milani, F. Tomas, & D. A. Campos, Edits.) 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, 453-480.
- Cardona, A., Valencia, V., Lotero, A., Villafañez, Y., and Bayona, G. (2016). Provenance of middle to late Palaeozoic sediments in the northeastern Colombian Andes: implications for Pangea reconstruction. *International Geology Review*, 58(15), 1914-1939. doi: 10.1080/00206814.2016.1190948.
- Cordani, U., Cardona, A., Jimenez, D., Liu, D., Nutman, A. (2005). Geochronology of Proterozoic basement inliers in Colombian Andes: tectonic history of remnants of a fragmented grenville belt. in: terrane processes at margins of gondwana. Geological Society, London, Special Publications. Edited by Vaughan, A.; Leat, P.; Pankhurst, R., 246: 329-346.
- Dörr, W., Grösser, J., Rodríguez, G., and Kramm, U., 1995. Zircon U-Pb age of the Páramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 8: 187-194.
- Gansser, A. (1973). Facts and theories on the Andes: twenty-sixth William Smith Lecture. *Journal of the Geological Society*, 129(2), 93-131.
- Goldsmith, R., Marvin, R. F., & Mehnert, H. H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes (pp. D44-D49). United States, Department of the Interior, Geological Survey.
- Gómez, J., Montes, N., Nivia, A., Diederix, H. Compiladores., 2015. Mapa Geológico de Colombia, escala 1:1'000.000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá.

- Mantilla, L. C., García, C. A., & Valencia, V. A. (2016a). Propuesta de Escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(1), 33-50. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016002>
- Mantilla, L. C., García, C. A., & Valencia, V. A. (2016b). Nuevas evidencias que soportan la escisión de la formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia). *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 320-336.
- Mantilla, L. C., Valencia, V. A., Barra, F., Pinto, J., & Colegial, J. D. (2009). Geocronología U-Pb de los cuerpos porfíricos del distrito aurífero de Vetas-California (Dpto de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 31-43.
- Mathur, R., Ruiz, J., Herb, P., Hahn, L., Burgath, P. 2003. Re-Os isotopes applied to epithermal gold deposits near Bucaramanga, northeastern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 815-821.
- Mendoza, H., & Jaramillo, L. (1979). Geología y geoquímica del área de California, Santander. *Boletín Geológico Ingeominas*, 22(2), 4-57.
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. (2005). *Microtectonics*. Springer Science & Business Media.
- Polania, J.H. 1980. Die Uranvorkommen von California be Bucaramanga (Kolumbien). Dissertation, University of Stuttgart, 152 p.
- Reynoso-Brito D. Y. & Turizo-Pedrozo V. S. (2024). Estudio petrográfico y de procedencia de las metasedimentitas ubicadas en los sectores Jordán-Aratoca (Santander) y Ocaña (Norte de Santander). Bucaramanga, Colombia: Geología, Universidad de Santander. Tesis de pregrado. Repositorio Digital Universidad de Santander.

- Rodríguez, G. (2022). Petrographic, chemical and geochronological characteristics of the Onzaga Metarhyolite and its correlation with Ordovician magmatic events in the northern Andes, Colombia. *Boletín Geológico*, 49(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.1.2022.571>
- Royero, J. M., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander, Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, 92p.
- Sarmiento, L., 2001. Mesozoic rifting and cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. PhD. Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam, 296p.
- Spear, F.S., 1993. Metamorphic Phase Equilibria and Pressure–Temperature–Time Paths. Mineralogical Society of America Monographs. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.. 799 pp
- Toussaint, J. F. (1993). Evolución geológica de Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Van Der Lelij, R., Spikings, R., & Mora, A. (2016). Thermochronology and Tectonics of the Mérida Andes and the Santander Massif, NW South America. *Lithos*, 248-251, 220-239. doi:10.1016/j.lithos.2016.01.006
- Vargas, R., & Arias, A. (1981). Geología de la Plancha 97 Cáchira Escala 1: 100000. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- Velandia, F. A. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Tesis Doctoral.

- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. P. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 132. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol-geol21.1-3.1973.383>
- Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., y Gómez, E. (1977). Mapa geológico del cuadrángulo H-12 Bucaramanga escala 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- Welton, J. E. (1984). *SEM petrology atlas* (Vol. 4). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.