

Estudio de las alteraciones hidrotermales aflorantes al norte de la jurisdicción territorial del municipio de Aratoca, sector SW del Macizo de Santander.

Nicolle Stephanie Aza Jiménez, y David Rueda Forero

Proyecto de grado para optar el título de Geólogo (a).

Director

Luis Carlos Mantilla Figueroa

PhD Geología económica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga, Santander

2026

Dedicatoria

A Dios. Siempre estuviste en cada uno de los pasos que di y aun sigues acompañándome.

A mi nona, Alicia Vargas. Me viste dar los primeros pasos en este camino allá en 2018, y me habría encantado tenerte aquí para mostrarte cómo logré llegar al final, a pesar de cada obstáculo. Sé que, desde el Cielo, estás conmigo y celebras este logro.

A mi nona, Delfida Chacón Vera. Tal vez hoy no recuerdes cómo comenzó este recorrido, pero deseo que permanezca en tu corazón el instante en que reciba mi título a tu lado. Ese momento será también tuyo.

A mis padres, Giovanni Aza y Yonilda Jiménez. Ustedes son la razón principal por la que hoy puedo llegar a este punto de mi vida, y no existirán suficientes páginas para expresar todo lo que siento al decir “al fin lo logré”. Estos dos últimos años no fueron fáciles, pero aun así me acompañaron con paciencia, cariño y un apoyo que nunca me faltó. Con un nudo en la garganta y el corazón lleno, puedo decirles: “al fin lo culminé, es por y para ustedes”.

A mis hermanos, Karen y Santi. Fueron un pilar enorme en las noches de desvelo y en los momentos difíciles. Aunque soy la mayor, en estos meses me sentí cuidada y protegida por ustedes, y eso nunca lo voy a olvidar.

- Nicolle Aza

Dedicatoria

A mis padres, Amparo y Eugenio, quienes han sido un pilar fundamental en cada etapa de este largo camino. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y su confianza en mí han sido la fuerza que me ha impulsado a continuar incluso en los momentos de mayor dificultad.

A mis hermanos, cuyo ánimo constante y motivación diaria me recordaron la importancia de perseverar y mantenerme enfocado en esta meta que hoy se materializa.

A mi pareja, Camila, por su cariño, comprensión y compañía inquebrantable, especialmente en aquellos momentos en los que las dudas o el cansancio parecían imponerse. Su presencia fue un refugio y un impulso para seguir adelante.

A mis amigos, por sus buenos deseos, su disposición para escucharme y las valiosas recomendaciones que me ofrecieron durante todo este proceso.

- David Rueda

Agradecimientos

A mi querida Universidad Industrial de Santander, por brindarnos siempre un apoyo invaluable y los recursos fundamentales para la elaboración de esta investigación.

A mi director de tesis Luis Carlos Mantilla, su acompañamiento y empeño constante durante todo este proceso fueron vitales para llegar a la culminación del estudio. Aprecio profundamente su paciencia y todo el respaldo que nos ofreció durante este tiempo.

A Ka, Ang y Sof, mis colegas geólogas favoritas. Gracias a ustedes, esta etapa universitaria fue más ligera y divertida. Deseo que este lazo nos mantenga unidas por muchos años más. Las quiero.

A mi familia y amigos, quienes desde el principio me acompañaron, y convirtieron mi paso por la Universidad en una etapa más cálida y significativa. También agradezco a todas las personas que en el 2025 se cruzaron en mi camino y aportaron palabras de ánimo, claridad y fortaleza a este proceso que hoy concluye. Jen, Sebas, Daniel y Danilo, valoro profundamente que hayan llegado a mi vida y que con sus ideas y cariño me ayudaran a avanzar y finalizar este trabajo de grado.

Por último, a mi compañero de tesis David Rueda Forero. Este trabajo no pudo haber sido nada de no ser por su dedicación y compañía.

- Nicolle Aza

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por ofrecer su apoyo institucional y los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo, especialmente al facilitar el uso de su infraestructura.

Su contribución resultó fundamental para el progreso de esta investigación.

A mi director, por su guía constante durante todo el proceso. Agradezco profundamente sus correcciones, sus enseñanzas y la paciencia con la que acompañó cada etapa.

A mi familia, mi pareja y mis amigos, por su presencia permanente, por su aliento inagotable y por confiar en mí en cada momento. Su comprensión y respaldo incondicional fueron un motor esencial para continuar.

- David Rueda

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Localización geográfica	15
3. Antecedentes	16
3.1 Marco geológico regional	16
3.1.1 <i>Falla de Bucaramanga</i>	19
3.2 Marco geológico gocal.....	19
3.2.1 <i>Granito de Pescadero</i>	19
3.2.2 <i>Esquistos del Chicamocha</i>	20
4. Metodología	22
4.1 Trabajo de Campo	22
4.2 Trabajo de oficina y laboratorio.....	22
4.2.1 <i>Descripción macroscópica</i>	22
4.2.2 <i>Descripción petrográfica</i>	23
4.2.3 <i>Difracción de Rayos-X (DR-X)</i>	23
5. Resultados	25
5.1 Geología del área objeto de estudio	25
5.2 Análisis macroscópico	29
5.2.1 <i>Muestra AR-1</i>	29
5.2.2 <i>Muestra AR-2</i>	33

5.3	Análisis petrográfico	37
5.3.1	<i>Muestra AR-1</i>	37
5.3.2	<i>Muestra AR-2</i>	39
5.4	Análisis difracción de rayos X (DR-X)	43
5.4.1	<i>Muestra AR-01</i>	43
5.4.2	<i>Muestra AR-02</i>	46
6.	Discusión.....	49
7.	Conclusiones	54
8.	Recomendaciones	55
	Referencias Bibliográficas	57

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i>	<i>Mapa de Geolocalización de la zona de estudio.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.</i>	<i>Mapa geológico del macizo de Santander. Modificado de Mantilla et al., 2016^a....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.</i>	<i>Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Mantilla et al., 2016a.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4.</i>	<i>Microscopio óptico de luz transmitida, NIKON E200 POL.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5.</i>	<i>Afloramiento de la Parada 1 en la vía Curos-Aratoca.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6.</i>	<i>Afloramiento de la Parada 2 en la vía Curos-Cepitá.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 7.</i>	<i>Sección 1 de afloramiento en Parada 2, vía curos-Cepitá.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8.</i>	<i>Sección 2 de afloramiento en Parada 2, vía curos-Cepitá.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9.</i>	<i>Muestra AR-01 extraída en Parada 1.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10.</i>	<i>Muestras AR-01, roca ígnea extraída en Parada 1.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11.</i>	<i>Muestras AR-01, roca ígnea extraída en Parada 1. Sección cortada y pulida.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 12.</i>	<i>Ficha de resumen de caracterización macroscópica de muestra AR-01.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 13.</i>	<i>Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 14.</i>	<i>Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2. Venas o grietas presentes.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15.</i>	<i>Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2. Presencia de Arcilla.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 16.</i>	<i>Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 17.</i>	<i>Muestras AR-2, roca alterada extraída en Parada 2, vista con Lupa 10X.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 18.</i>	<i>Ficha de resumen de caracterización macroscópica de muestra AR-02.....</i>	<i>37</i>

<i>Figura 19.</i>	<i>Sección delgada muestra AR-01 en 5X, punto 1.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20.</i>	<i>Sección delgada muestra AR-01 EN 5X, punto 2.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21.</i>	<i>Sección delgada muestra AR-02 EN 5X, punto 1.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22.</i>	<i>Sección delgada muestra AR-02 EN 5X, punto 2.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 23.</i>	<i>Sección delgada muestra AR-02 en 5X, vena de cuarzo.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24.</i>	<i>Sección delgada muestra AR-02 en 5X, fracturas de óxido de Hierro.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 25.</i>	<i>Resultados obtenidos de AR-01 en Softwares PROFEX y DIFFRAC.EVA, respectivamente.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 26.</i>	<i>Patrón de difracción de rayos X (DR-X) de muestra AR-01.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 27.</i>	<i>Resultados obtenidos de AR-02 en Softwares PROFEX y DIFFRAC.EVA, respectivamente.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 28.</i>	<i>Patrón de difracción de rayos X (DR-X) de muestra AR-02.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 29.</i>	<i>Propuesta de mapa geológico local, basado y editado de la Plancha 5-06, escala 1:500.000, Atlas geológico de Colombia (2023), SGC.</i>	<i>49</i>

Lista de tablas

Tabla 1.	<i>Condiciones para realización de procedimiento en DRX.....</i>	24
Tabla 2.	<i>Contextos paragenéticos con base a eventos de Alteraciones Hidrotermales históricos.....</i>	50

Resumen

Título: Estudio de las alteraciones hidrotermales aflorantes al norte de la jurisdicción territorial de Aratoaca, sector SW del Macizo de Santander. *

Autor: Nicolle Stephanie Aza Jiménez, David Rueda Forero. **

Palabras Clave: Alteraciones hidrotermales.

Descripción: El presente trabajo de tesis de pregrado ‘modalidad investigación’ tiene como objetivo caracterizar las alteraciones hidrotermales aflorantes al norte de la jurisdicción territorial de Aratoaca, localizado en el sector suroccidental del Macizo de Santander, Colombia. Esta investigación se realiza con el propósito de inventariar los diferentes pulsos paleohidrotermales que han afectado el Macizo de Santander, y poder establecer (de manera preliminar) su posible importancia metalogénica.

Los resultados de los estudios realizados a lo largo de este proyecto indican la presencia de rocas ígneas félsicas asociadas al magmatismo de finales del Triásico–comienzos del Jurásico (~200 Ma), desarrollado en un contexto de supra-subducción y emplazado en rocas metamórficas vinculadas al evento orogénico Famatiniano (~480 Ma). Estas litologías afloran como diques riolíticos afectados por procesos epigenéticos de edad indeterminada, relacionados con la circulación de fluidos hidrotermales, que generaron principalmente alteraciones de tipo cuarzo–sericita ± pirita (fílica) y cuarzo + clorita (propilítica).

En el contexto de lo anteriormente referido, se concluye que el tramo objeto de estudio, debió ser afectado por fluidos de tipo magmático-hidrotermal (epigenéticos, en relación con la roca ígnea félsica alterada hidrotermalmente), cuya edad e implicaciones metalogénicas aún se desconocen, pero que merecen especial atención, debido a su afinidad con procesos hidrotermales asociados a sistemas tipo pórfido.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. PhD Geología Económica.

Abstract

Title: Study of Hydrothermal Alterations Exposed North of the Territorial Jurisdiction of Aratoca, Southwestern Sector of the Santander Massif. *

Authors: Nicolle Stephanie Aza Jiménez, David Rueda Forero. **

Keywords: Hydrothermal alterations.

Description: This undergraduate thesis (research modality) aims to characterize the hydrothermal alterations cropping out to the north of the territorial jurisdiction of Aratoca, located in the southwestern sector of the Santander Massif, Colombia. The purpose of this research is to invent the different paleohydrothermal pulses that have affected Santander Massif and to preliminarily assess their potential metallogenic significance.

The results obtained throughout this study indicate the presence of felsic igneous rocks associated with Late Triassic–Early Jurassic magmatism (~200 Ma), developed in a supra-subduction tectonic setting and emplaced within metamorphic rocks temporally related to the Famatinian orogenic event (~480 Ma). These lithologies crop out as rhyolitic dikes affected by epigenetic processes of undetermined age, linked to the circulation of hydrothermal fluids, which mainly generated quartz–sericite ± pyrite (phyllic) and quartz + chlorite (propylitic) alteration assemblages.

Based on the foregoing, it is concluded that the study area was affected by magmatic–hydrothermal fluids (epigenetic and genetically related to the hydrothermally altered felsic igneous rocks), whose age and metallogenic implications remain unknown but warrant special attention due to their affinity with hydrothermal processes associated with porphyry-type systems.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Supervisor: Luis Carlos Mantilla Figueroa, PhD in Economic Geology.

Introducción

En el Macizo de Santander se han reportado alteraciones hidrotermales afines a alteraciones tipo pórfido, al menos en dos zonas: Una de estas se encuentra ubicada en el sector norte del Macizo de Santander, conocido como el distrito minero de Vetas-California y la otra, hacia el sector sur, en la zona del tramo Mogotes-San Joaquín (Mantilla *et al.*, 2011; Gamboa, 2016; Bissig *et al.*, 2014, otros). La primera zona (Vetas-California), de edad Neógeno, ha mostrado un importante valor metalogénico, sin embargo, la zona sur (Mogotes-San Joaquín), de edad aún no establecida (aunque preliminarmente se asocia con eventos de edad Jurásica, dada las edades Ar-Ar (Mantilla y García, 2018); no ha mostrado por ahora un gran valor metalogénico, salvo puntuales anomalías en metales preciosos (Gamboa, 2016).

En este contexto regional, la identificación de un nuevo sector dentro del Macizo de Santander —correspondiente al área objeto del presente estudio— que presenta segmentos con alteraciones hidrotermales afines a sistemas tipo pórfido, constituye un elemento de alto interés científico y exploratorio. Esta afinidad, considerada de manera apriorística, sugiere la necesidad de estudios detallados orientados a establecer la naturaleza, edad y evolución de los fluidos hidrotermales involucrados, así como su posible relación con procesos metalogénicos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar y estudiar los contextos paragenéticos asociados a las alteraciones hidrotermales en rocas ígneas aflorantes en el sector SW del Macizo de Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión bibliográfica del sector SW del Macizo de Santander, para fines de contextualizar el objeto de estudio, desde el punto de vista de la geología regional y local.

Realizar un análisis mineralógico-petrográfico, mediante microscopía óptica de luz transmitida, para fines de identificar los contextos paragenéticos asociados a los diferentes eventos de alteración hidrotermal que afectaron las rocas del área de estudio.

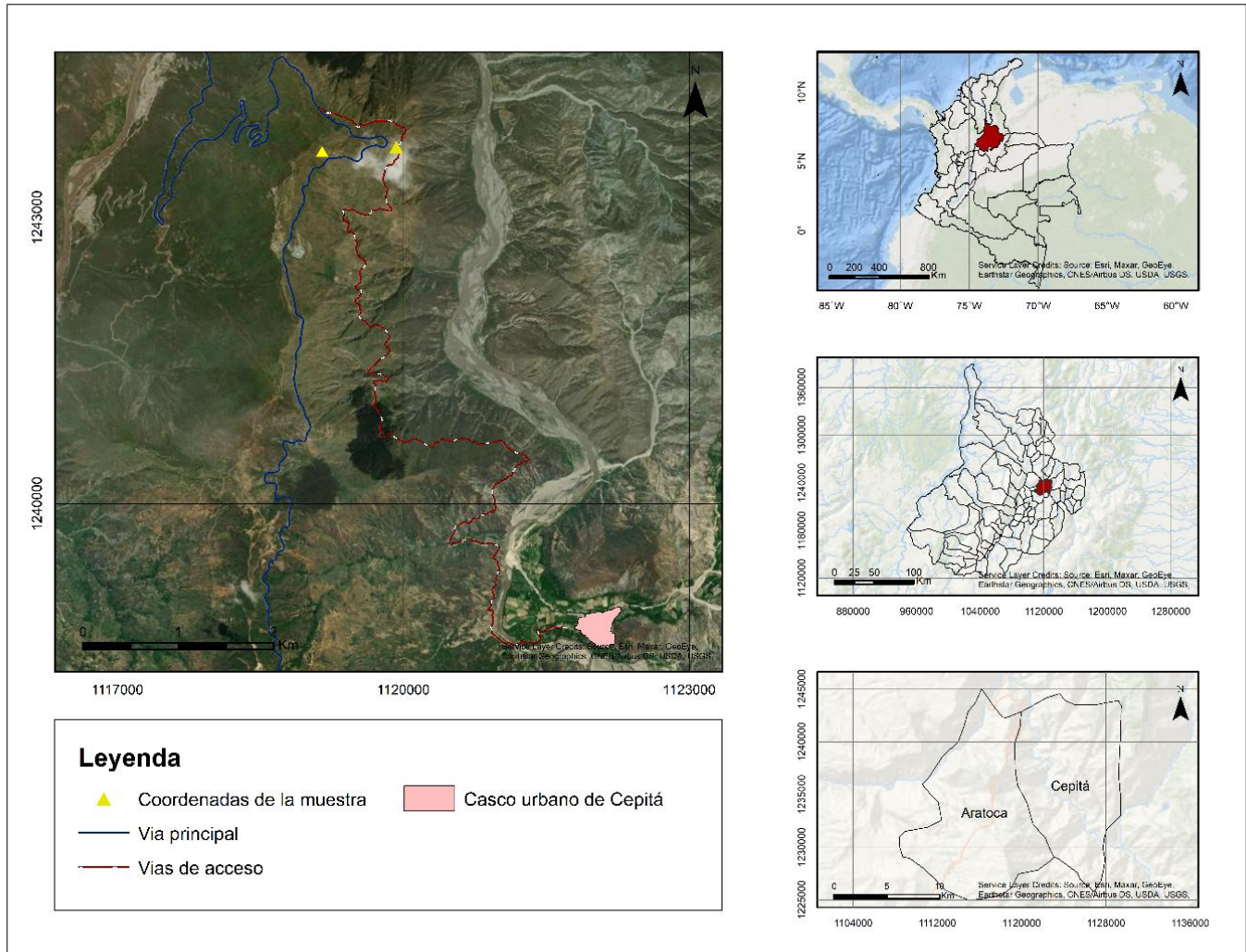
Establecer la temporalidad relativa entre las diferentes litologías y las alteraciones hidrotermales presentes en el área de estudio.

Realizar análisis textural de minerales concretos de los diferentes contextos paragenéticos asociados a las alteraciones hidrotermales, con el propósito de aportar información sobre la posible génesis de los paleofluidos.

Generar sobre la base de los datos obtenidos, un modelo preliminar sobre la génesis y las implicaciones de los procesos paleohidrotermales objeto de estudio.

2. Localización geográfica

Figura 1. Mapa de Geolocalización de la zona de estudio.



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

3. Antecedentes

3.1 Marco geológico regional

La comprensión geológica de una zona de estudio requiere necesariamente su contextualización a escala regional, ya que esto permite entender adecuadamente su evolución tectónica, así como los rasgos litológicos y estructurales que la definen. En este sentido, el Macizo de Santander constituye una unidad geológica importante situada en el mismo departamento en un punto de convergencia estructural dentro de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos. Su constitución está dominada por litologías ígneas y metamórficas y sedimentarias.

El Macizo de Santander es una continuación de la Cordillera Oriental de Colombia y forma el margen suroccidental del Bloque Triangular de Maracaibo. Su límite oriental está definido por cabalgamientos del Cenozoico tardío que lo separa de los Andes de Mérida (Macellari, 1984). Hacia el norte de Bucaramanga, su margen occidental está claramente definido por la falla Santa Marta-Bucaramanga a lo largo de una tendencia NNW, aunque se pueden encontrar unidades de basamento similares a ambos lados de la misma falla, donde se une con el macizo Floresta (Van der lelij., *et al* 2015).

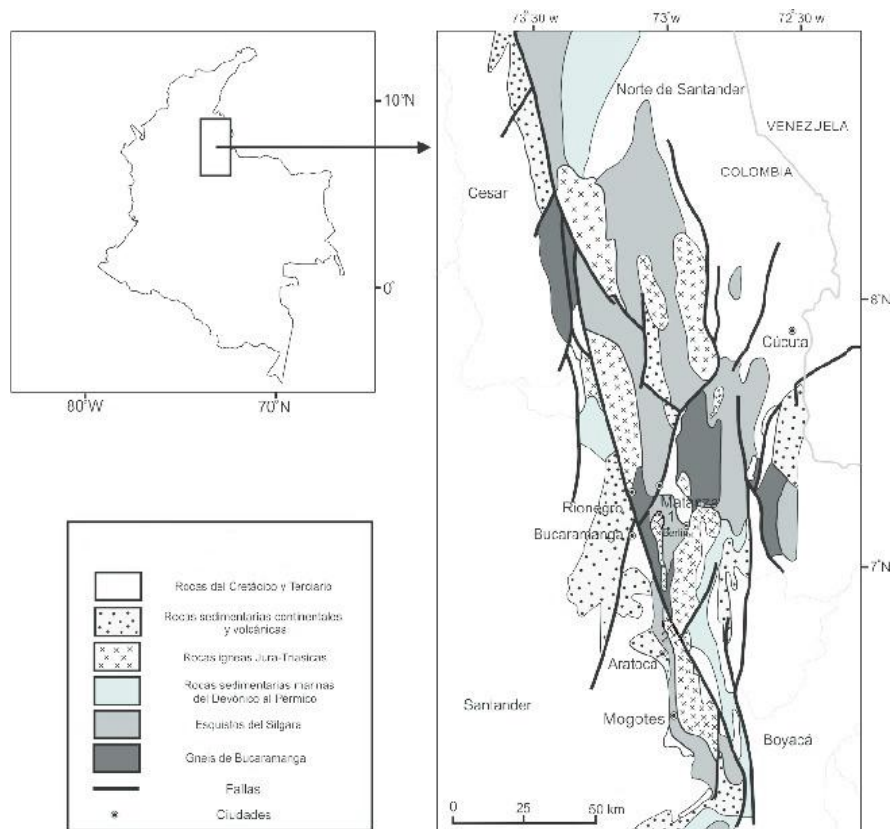
Las unidades que conforman el basamento del Macizo de Santander han sido identificadas como el Neis de Bucaramanga, el Ortogneis y la Formación Silgará, dichas unidades metamórficas se encuentran discordantemente cubiertas por depósitos sedimentarios correspondientes a la Formación Floresta, de edad devónica (Ward et al., 1973). La unidad más antigua expuesta en el Macizo de Santander es el gneis de Bucaramanga, que consiste en paragneis pelíticos a silíceos de alto grado con menor presencia de anfibolitas, mármoles y migmatitas, por otro lado, la Formación Silgará está compuesta principalmente por filitas, pizarras, cuarcitas y metacuarcitas. Estas dos formaciones (Formación Silgará y Gneis de Bucaramanga) están ambas invadidas por el ortogneis,

fuertemente foliado y compuesto por cuarzo y feldespato (Ward et al., 1974). Se deduce que se superpone al gneis de Bucaramanga y que, en varios lugares, está cubierta principalmente por rocas sedimentarias no metamórficas del Devónico Medio de la Formación Floresta, lo que sugiere que el metamorfismo se produjo antes del Devónico Medio. Los contactos con el gneis de Bucaramanga son difíciles de identificar y suelen seguir isogradas (Ward et al., 1974).

La historia magmática del Macizo de Santander incluye varios episodios que han quedado registrados tanto en rocas plutónicas como volcánicas. El primer pulso corresponde a un magmatismo granítico que dio origen a los cuerpos del Granito de Durania, con edades K-Ar alrededor de 461 Ma (Ward *et al.*, 1973). Aunque las dataciones han sido discutidas, distintos autores coinciden en ubicar este evento en el Ordovícico tardío, dentro del mismo intervalo temporal de unidades como la Formación Ortonéis. Un segundo pulso, también del Ordovícico, está asociado a las rocas volcánicas conocidas como la Metariolita de Onzaga, cuya edad más aceptada es cercana a 451 Ma (Rodríguez, 2022). Este episodio refleja un ambiente donde coexistieron actividades plutónicas y volcánicas dentro del basamento del macizo. El tercer pulso involucra magmatismo intermedio a félsico, representado por el Grupo Plutónico de Santander. Sus edades Rb-Sr y U-Pb rondan los 210 Ma, lo que lo sitúa en la transición Triásico–Jurásico. Este evento está relacionado con un periodo de reactivación tectónica regional ampliamente discutido en trabajos como los de Polanía (1980) y Dorr et al. (1995). Posteriormente, el cuarto pulso refleja un magmatismo posiblemente bimodal, caracterizado por la intrusión de diabasas y diques riolíticos. Las edades K-Ar obtenidas en materiales asociados se aproximan a los 127 Ma, dentro del Cretácico temprano (Ward *et al.*, 1973). Este pulso suele vincularse a un contexto tectónico extensional. El quinto pulso, ya en el Paleoceno–Eoceno, muestra edades cercanas a 57 Ma. Estudios Re-Os en sulfuros del distrito de California sugieren que este episodio estuvo

acompañado de actividad hidrotermal vinculada a mineralizaciones auríferas (Mathur *et al.*, 2003). Finalmente, el sexto pulso ocurrió durante el Mioceno, entre 8 y 9 Ma, y está representado por cuerpos porfíricos asociados a los sistemas hidrotermales del distrito Vetas–California (Mantilla *et al.*, 2009). Este evento tiene un papel clave en la génesis de las mineralizaciones auríferas actuales.

Figura 2. Mapa geológico del macizo de Santander. Modificado de Mantilla *et al.*, 2016a



No hay rocas sedimentarias reconocidas del Paleozoico temprano en el macizo de Santander y el basamento metamórfico está recubierto de forma discordante por unidades del Paleozoico tardío. La Formación Floresta, del Devónico medio, está compuesta por rocas sedimentarias marinas que recubren de forma discordante la Formación Silgará en varios lugares. Estas rocas, junto con la formación Diamante del Carbonífero tardío que las recubre, se metamorfosearon en condiciones de bajo grado, pero sus patrones isogradales no coinciden con

los del basamento y el metamorfismo parece estar relacionado con un evento diferente anterior al depósito de las formaciones más recientes Tiburón, Bocas, Jordan y Girón (Ward *et al.*, 1974).

3.1.1 Falla de Bucaramanga

La Falla de Bucaramanga es una estructura geológica importante ubicada en Colombia, específicamente en el departamento de Santander, en la región andina del país. Se considera como una estructura de sistema de fallas de rumbo con movimiento sinistral con un desplazamiento estimado entre 30 y 240 km (Boinet *et al.*, 1989; Duque Caro, 1980; Montes *et al.*, 2010; Ward *et al.*, 1973). Es de las estructuras más significativas en la zona y ha sido objeto de estudio e investigación durante muchos años debido a su potencial sismogénico y sus implicaciones geológicas (Toro, 1990). Entre la variedad de características que presenta, se contemplan principalmente su tipo de falla, que trata de una falla de rumbo dextral (movimiento horizontal derecho), también es relevante, la extensión geográfica de la Falla de Bucaramanga, la cual, se extiende aproximadamente en dirección noroeste-sureste a lo largo de cientos de kilómetros (Galvis *et al.*, 2014), afectando principalmente a los departamentos de Santander y Norte de Santander, como también se han identificado segmentos más pequeños en las áreas cercanas.

3.2 Marco geológico local

3.1.2 Granito de Pescadero

El granito típico de Pescadero es rosado naranja, de grano fino a muy fino, equigranular a ligeramente porfirítico. Algunas rocas tienen cavidades rellenas de cuarzo, pero se cree que está relacionado con el fallamiento. Constituye un plutón alargado de forma algo irregular al oeste de la falla de Bucaramanga. Hacia el oeste, el granito intruye metasedimentos de la formación silgará. En esta área podría ser considerado como Batolito de Mogotes, debido a que la masa principal de Mogotes hacia el sur contiene roca como la de pescadero y una fase biotita de pescadero es similar a la cuarzomonzonita con biotita de Mogotes (Ward *et al.*, 1973).

En esta unidad predominan los sienogranitos, monzogranitos y granodioritas. Donde los sienogranitos están compuestos por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo, biotita, moscovita, como accesorios apatito y circón, trazas de titanita y minerales de alteración caolinita, epidota y calcita; los monzogranitos están compuestos por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo, biotita, moscovita y trazas de apatito, circón, titanita y epidota; la granodiorita contiene plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico (Zapata *et al.*, 2016).

Los diques del Granito de Pescadero incluyen pegmatitas, aplitas, riolitas porfíricas y riolacitas. Los de riolita porfírica tienen fenocristales de albita u oligoclasa sódica y algunos de cuarzo, ortoclasa y clorita. La matriz es microcristalina con feldespatos y cuarzos subesféricos (Ward *et al.*, 1973).

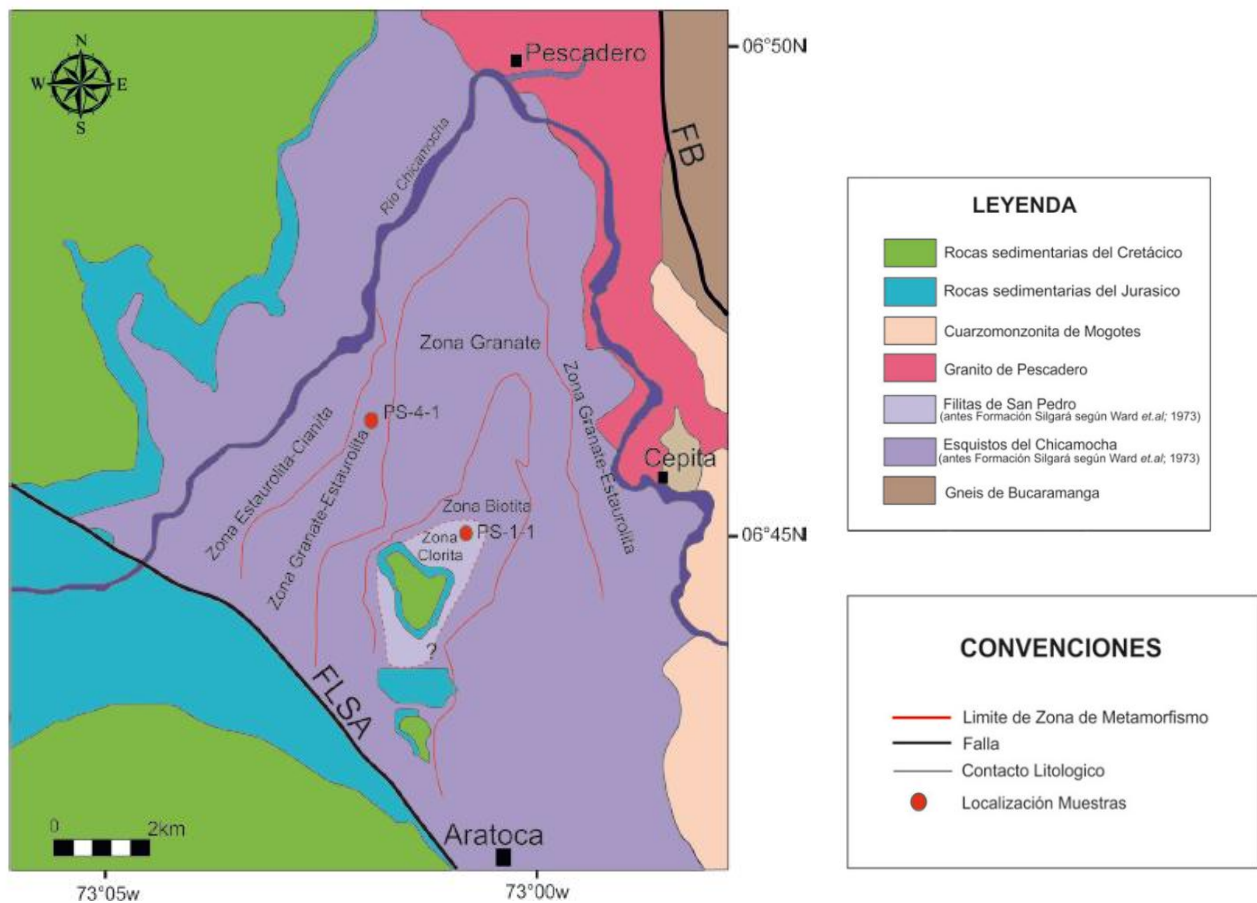
El basamento también se encuentra constituido por roca metamórficas descritas por Ward *et al.*, 1973 como secciones de cuarcitas estratificadas e intercalaciones de esquistos micáceos y meta-areniscas llamadas esquistos de Silgará, sin embargo, en estudios más recientes Mantilla *et al.*, 2016a, concluye que esta formación debería ser dividida debido a diferencias litológicas y los distintos picos de metamorfismo en cada tramo (Matanza-Cachiri y Piedecuesta-Aratoca), nombrando esta sección del basamento como Esquistos del Chicamocha

3.2.1 Esquistos del Chicamocha

Esta formación está compuesta principalmente por metapelitas representadas por esquistos con cuarzo, muscovita, biotita, clorita, plagioclasa, granate, andalucita, estaurolita, cianita y silimanita como minerales principales. Esta formación también está compuesta por metasapmitas con cuarzo, plagioclasa, microclina, muscovita, biotita y granate. Litológicamente son esquistos micáceo-feldespáticos y cuarcitas con texturas lepidogranoblasticas y porfidoblasticas. Por último,

las metabásticas, son esquistos anfibólicos y anfibolitas que ocurren como niveles masivos de forma lenticular o cuerpos intermitentes con esquistos pelíticos. Están compuestas principalmente por plagioclasa, hornblenda, epidota, cuarzo, biotita, magnetita e ilmenita. Además, se presenta una sucesión de minerales indicadores de metamorfismo que definen una zonación metamórfica, correspondiente a las facies de esquistos verdes, transición epidota–anfíbolita y anfíbolita (Mantilla *et al.*, 2016a).

Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Mantilla *et al.*, 2016a.



4. Metodología

4.1 Trabajo de Campo

La fase de campo de este trabajo fue llevada a cabo por medio de las salidas de campo prácticas de la asignatura Campo II, de los semestres 2022-2 y 2023-2, siendo dirigidas por los docentes Luis Carlos Mantilla y Leonardo Palmera. Durante el campo, se dio el reconocimiento del área de estudio y, basándose en la información recopilada previamente, se identifican las potenciales litologías aflorantes de la zona; de la mano de la colaboración directa de dichos grupos se efectúa una salida alterna a reconocer la zona previamente coordinada de estudio, se realiza una descripción con registro fotográfico de la geología presente visualmente y se recolectan las muestras de mano que son objeto de estudio del presente proyecto.

Así mismo, en diciembre del 2024 se realiza una salida de campo a la zona de estudio, igualmente dirigida por el docente Luis Carlos Mantilla. En dicho trabajo de campo se realizaron dos paradas; la parada 1, en donde se comprenden las rocas de origen ígneo que, creemos es la base sobre la que se alteraron las rocas relevantes para este estudio y, la parada 2, zona en la cual afloran las rocas con alteraciones de origen hidrotermal.

4.2 Trabajo de oficina y laboratorio

Esta fase de laboratorio consiste en la interpretación de datos obtenidos en campo y la aplicación de diversos métodos de análisis a las muestras previamente recolectadas. La fase se subdivide en cuatro etapas explicadas a continuación.

4.2.1 Descripción macroscópica

La descripción macroscópica de rocas es una etapa crucial en la caracterización geológica, permitiendo una identificación preliminar de las muestras y proporcionando información esencial para estudios posteriores más detallados. En esta metodología, se detallarán los pasos y criterios utilizados para realizar una descripción macroscópica precisa y sistemática de las rocas. Se

evaluarán colores, texturas, estructuras, composiciones mineralógicas, entre otras características que puedan presentar las muestras a estudiar.

4.2.2 Descripción petrográfica

La descripción petrográfica de secciones delgadas de rocas es un paso fundamental en el análisis geológico, permitiendo una caracterización detallada de la composición mineralógica y la textura de las rocas. Este procedimiento se lleva a cabo utilizando un microscopio petrográfico y sigue un enfoque sistemático para garantizar una descripción precisa y coherente de las características petrográficas de las muestras de roca.

Se realizaron análisis de microscopía óptica para identificar y caracterizar las fases minerales presentes en las litologías estudiadas, así como para determinar sus contextos paragenéticos y características texturales. Para el estudio de secciones delgadas, se empleó un microscopio óptico de luz transmitida NIKON E200 POL (figura 4), disponible en el laboratorio de microscopía óptica (laboratorio 315).

Figura 4. *Microscopio óptico de luz transmitida, NIKON E200 POL.*



4.2.3 Difracción de Rayos-X (DR-X)

La Difracción de Rayos X (DRX) es una técnica analítica utilizada para identificar la composición mineralógica de las rocas y determinar su estructura cristalina. Este método es crucial

en estudios geológicos, proporcionando información detallada sobre los minerales presentes en las muestras. A continuación, se describe la metodología para realizar análisis de DRX en rocas de estudio.

Los análisis de DRX se llevaron a cabo en el laboratorio de Difracción de Rayos X de la UIS (sede Guatiguará), parte del Grupo de Investigación en Química Estructural (GIQUE). El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las condiciones presentadas en la tabla 1. Se utilizó una porción de 4 g de muestra mineral, la cual fue secada, molturada y tamizada (malla 400, 38 μm). El análisis realizado fue de tipo cualitativo, con el fin de determinar los minerales presentes en la muestra.

Tabla 1. *Condiciones para realización de procedimiento en DRX.*

Metodología de trabajo		
Condiciones de Registro	El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:	
	Voltaje (kV)	40
	Corriente (mA)	40
	Rendija de Divergencia (mm)	0,6
	Rendijas Soller Primario (*)	2,5
	Rendijas Soller Secundario (*)	2,5
	Tamaño de Paso (* 2Theta)	0,02035
	Tiempo de Paso (s)	1,2
	Rango de registro (* 2 Theta)	4,0 a 70,0
	Radiación	CuK α 1
	Filtro	Níquel
	Uso de Anti-dispersor de Aire	Si
	Detector	Lineal LynxEye
	Tipo de barrido	A pasos
	Observaciones	Ninguna

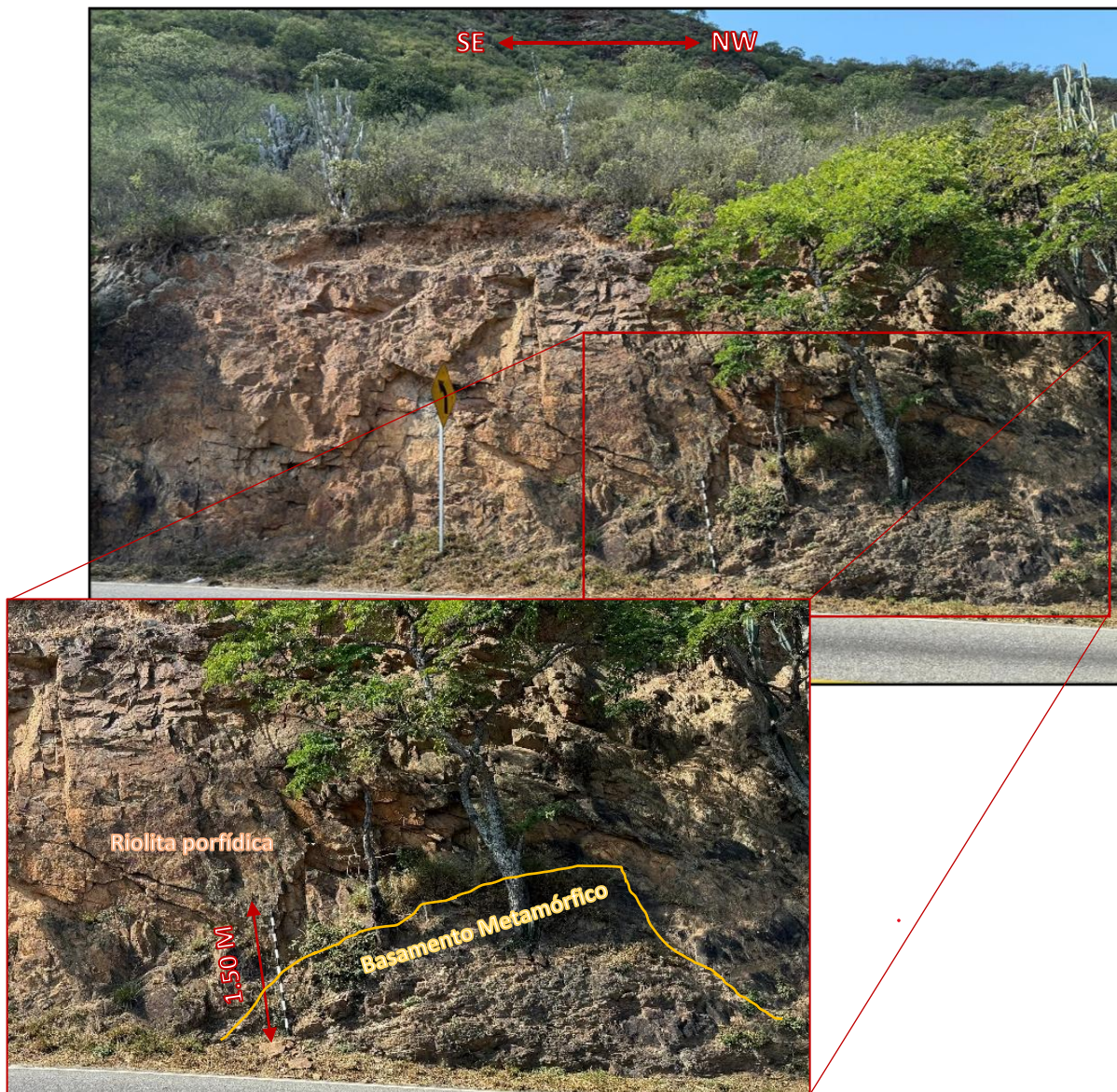
5. Resultados

5.1 Geología del área objeto de estudio

Estación 1: 16 de diciembre de 2024, 9:30 am. Carretera vía Bucaramanga-Aratoca, margen derecho. Coordenadas: X = 1.119.101; Y = 1.244.152; Z = 1.144 MSNM

Este primer afloramiento corresponde a una unidad subvolcánica félsica de composición riolítica expuesto en la carretera Pescadero-Cepitá y parcialmente cubierto por vegetación en la parte superior.

Figura 5. Afloramiento de la Parada 1 en la vía Curos-Aratoca.



La roca presenta una textura porfídica bien desarrollada caracterizada por fenocristales de cuarzo y feldespato potásico en una matriz félsica fina. Los colores varían de pardo- rojizo a pardo oscuro, lo que refleja la composición original como los efectos de alteración. La roca muestra evidencias de alteración supérgena, principalmente oxidación de minerales por sus coloraciones pardas.

Se encuentra basamento metamórfico que, está siendo cortado por el cuerpo hipoabisal paralelamente a la foliación de dicha roca metamórfica. Al contemplar el amplio cuerpo ígneo a la izquierda del afloramiento, se da la clara impresión de la presencia de sericitización que, empieza a hacerse más notable hacia el margen izquierdo de la sección estudiada en esta primera parada.

Estación 2: 16 de diciembre de 2024, 10:04 am. Desvío vía Bucaramanga – Cepitá, margen derecho. Coordenadas: X = 1.119.946; Y = 1.243.720; Z = 1.088 MSNM

Llegada a la zona de estudio, lo primero que se contempla es el afloramiento ubicado en una curva ampliamente abierta con una proximidad panorámica de 50 a 60 metros de ancho y unos 11 a 12 metros de altura.

Figura 6. Afloramiento de la Parada 2 en la vía Curos-Cepitá.



El afloramiento corresponde, en términos generales, a un cuerpo de origen ígneo, inferido a partir de la asociación mineralógica observable a simple vista, la cual se caracteriza por la presencia dominante de cuarzo y moscovita, con escasa proporción de feldespatos, acompañados por minerales secundarios de tonalidades verdosas. Las variaciones cromáticas y la distribución de las fases minerales sugieren una litología félsica, coherente con un protolito ígneo de composición ácida.

Este cuerpo ígneo engloba un sector claramente afectado por procesos de alteración hidrotermal, reconocido por el cambio progresivo de coloración hacia tonalidades claras, que varían de amarillentas pálidas a blancas, así como por una modificación significativa de las propiedades físicas de la roca. En particular, la zona alterada presenta una disminución en el grado de cohesión y compactación en comparación con la roca ígnea circundante, lo cual es consistente con procesos de reemplazo mineral y debilitamiento textural asociados a la interacción fluido-roca.

Dentro del afloramiento se identificaron dos sectores de interés principal, los cuales concentran una mayor proporción de material alterado y exhiben de manera más evidente las características asociadas a dichos procesos. En estos sectores se observa un conjunto de bloques con tonalidades predominantemente blancas a grises claras, interpretadas como producto de alteración hipógena, asociada principalmente a la presencia de cuarzo y sericita. Adicionalmente, se reconocen zonas con coloraciones amarillentas a ocre, de carácter más friable, atribuibles a procesos de alteración supérgena, tales como la oxidación de minerales portadores de hierro y el desarrollo de minerales arcillosos.

Figura 7. Sección 1 de afloramiento en Parada 2, vía cueros-Cepitá.

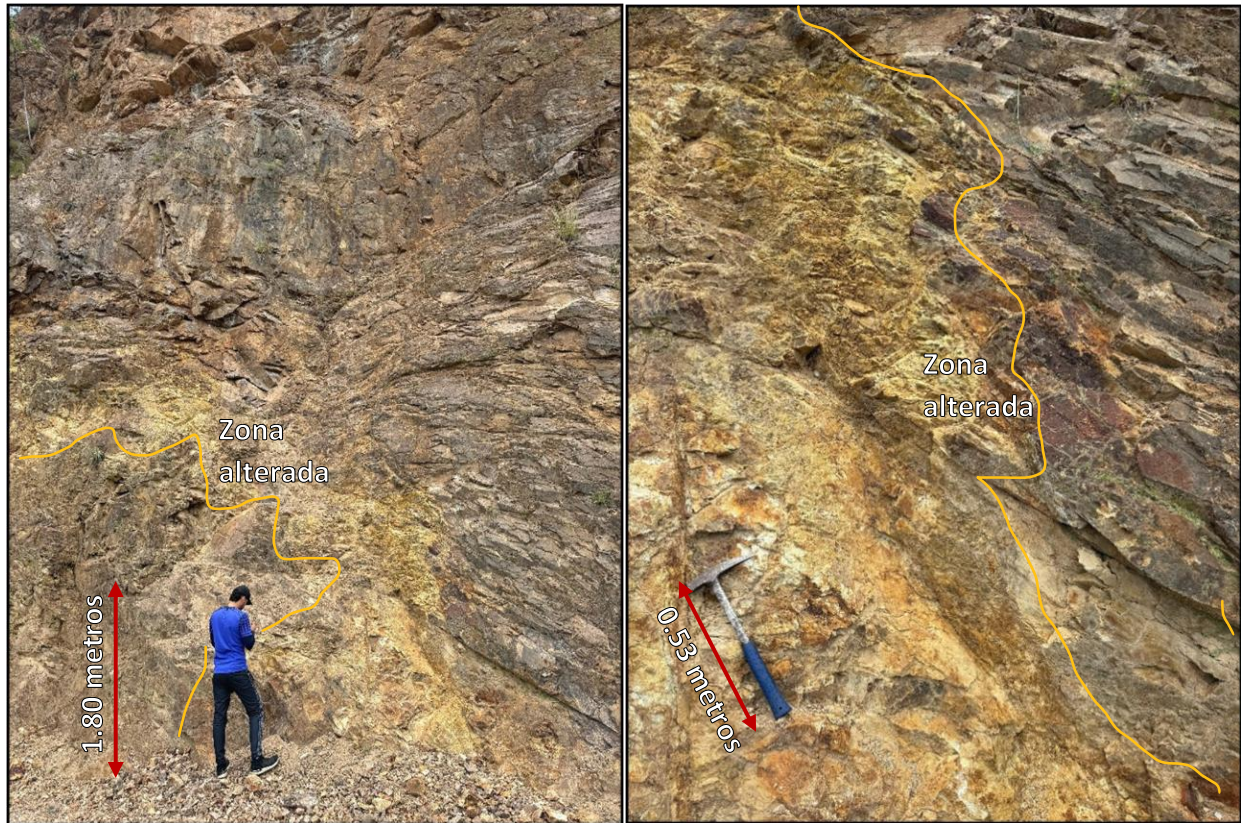
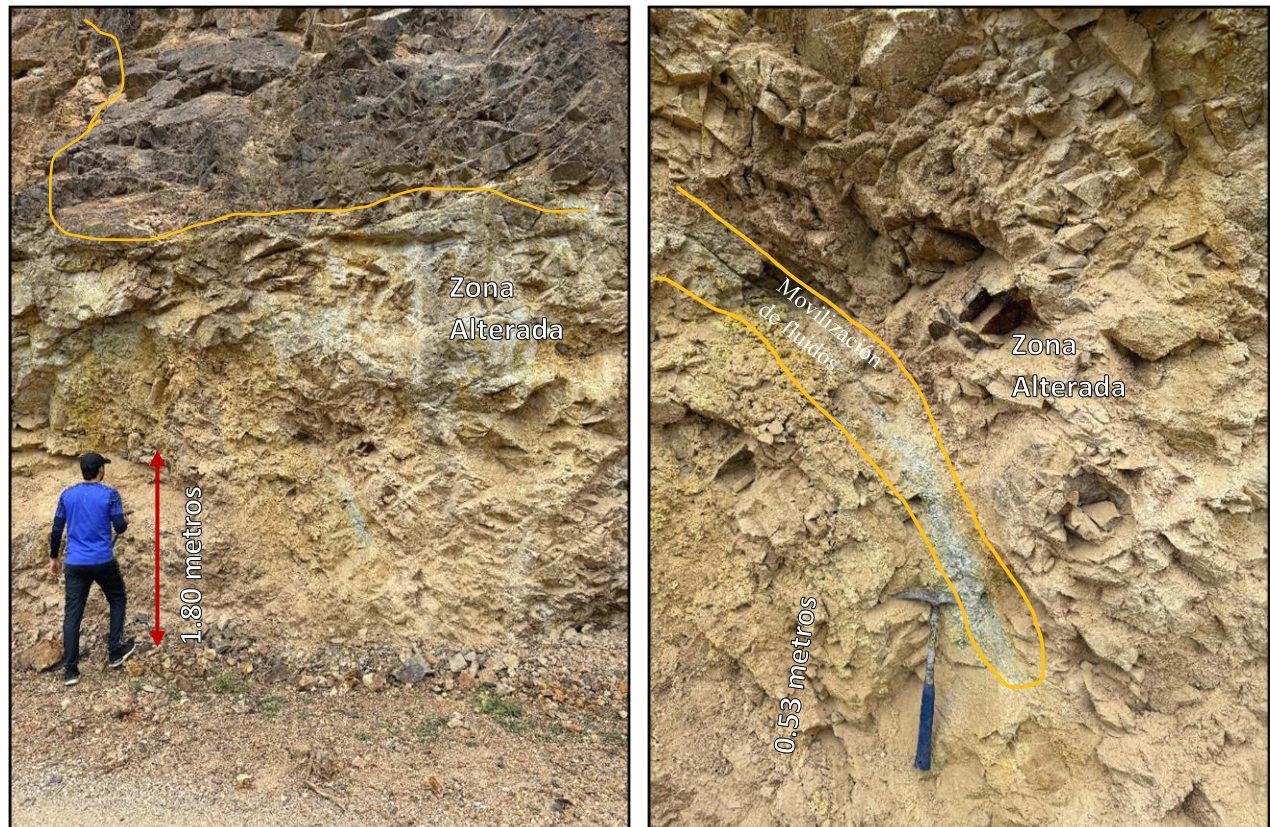


Figura 8. Sección 2 de afloramiento en Parada 2, vía cueros-Cepitá.



Contrastando lo contemplado en ambas paradas, se concluye que en la parada 2, la zona alterada posee pequeñas secciones alargadas que concentran una mayor cantidad de cuarzo y tonos más blancos y grisáceos en su coloración.

5.2 Análisis macroscópico

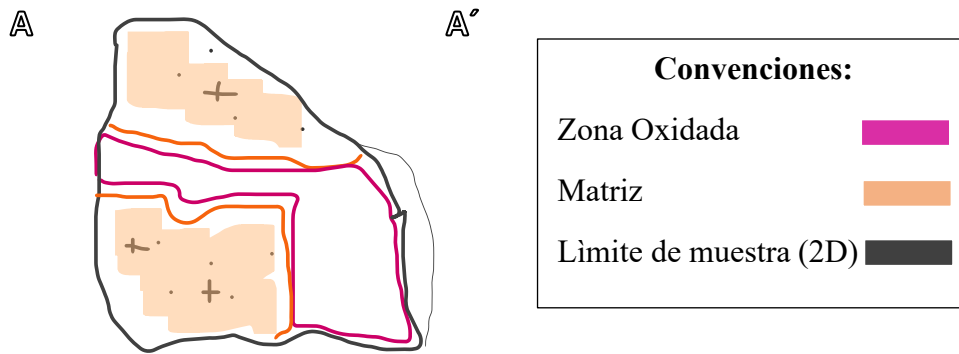
5.2.1 Muestra AR-1

La muestra corresponde a una roca ígnea con textura porfídica. Presenta minerales claramente distinguibles a simple vista, entre los cuales se reconocen fases félsicas de tonalidades blanquecinas a grisáceas y minerales máficos de color negro a verde oscuro. El color global de la roca es gris rosáceo a pardo, con sectores que exhiben tonalidades ocres asociadas a procesos incipientes de oxidación.

En algunas superficies se observa un sistema de fracturas subparalelas, acompañado de leve oxidación superficial, lo cual sugiere la acción de procesos de meteorización y/o alteración post-emplazamiento. Estas características texturales y cromáticas son consistentes con una roca ígnea plutónica moderadamente afectada por procesos secundarios de baja intensidad.

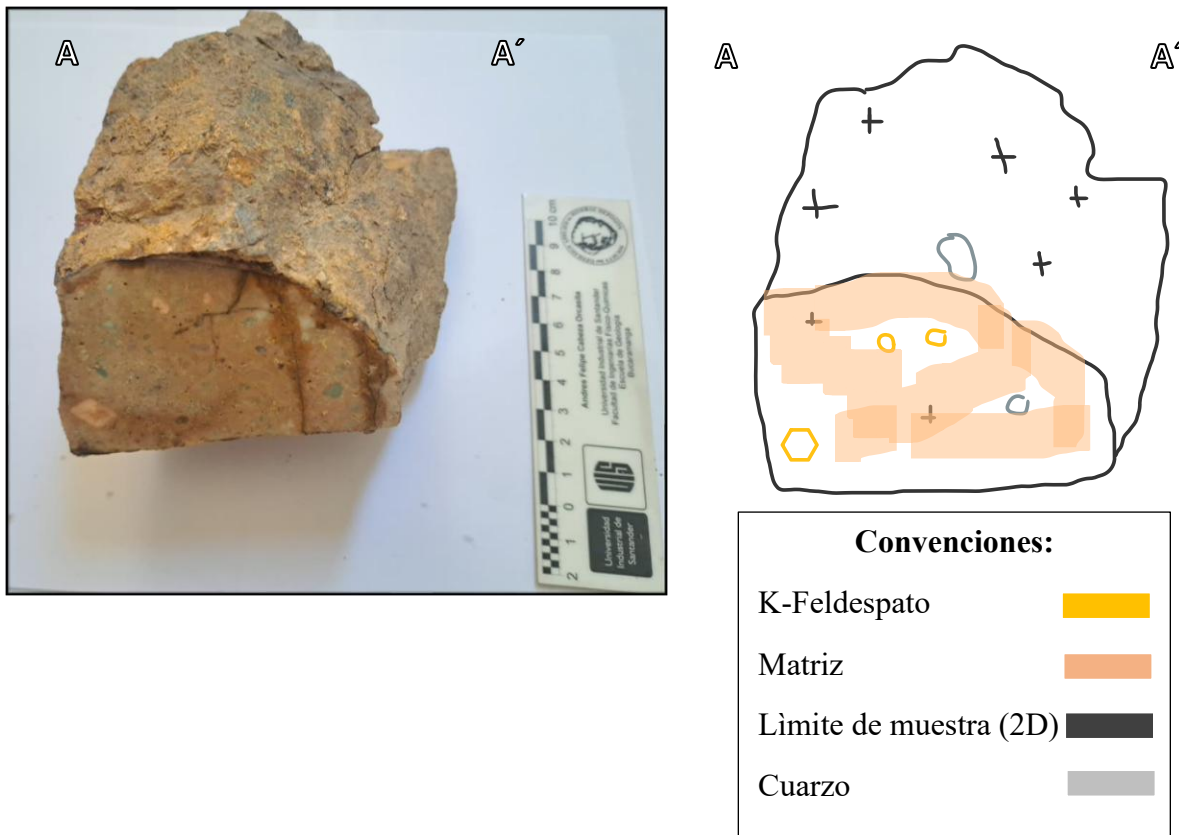
Figura 9. Muestra AR-01 extraída en Parada 1.





La roca presenta una matriz dominada por feldespato potásico, el cual constituye aproximadamente el 50 % o más de la composición total y es responsable de las tonalidades rosadas a pardas que caracterizan el aspecto macroscópico de la muestra. Se reconocen cristales de cuarzo subhedrales a anhedrales, con tamaños que oscilan entre 1 y 2 mm, asociados a cristales relictos de feldespato potásico de dimensiones comparables, distribuidos de manera heterogénea dentro de la matriz.

Figura 10. Muestras AR-01, roca ígnea extraída en Parada 1.



Adicionalmente, se observan parches o dominios localizados que evidencian la acción de procesos secundarios, interpretados como posibles eventos de oxidación, los cuales se manifiestan en tonalidades más oscuras, que varían entre rojizas y verdosas. Estas zonas sugieren una alteración incipiente y localizada, posiblemente relacionada con la circulación de fluidos oxidantes o procesos superficiales posteriores al emplazamiento de la roca.

Figura 11. Muestras AR-01, roca ígnea extraída en Parada 1. Sección cortada y pulida.




Esta muestra presenta una coloración rosada-anarajandada con algunos parches más pardos producto de oxidación, con textura porfirítica e inequigranular. A nivel macroscópico se identifican minerales como el feldespato potásico, cuarzo, sericita, plagioclasa y óxidos de hierro (figura 11).

El feldespato potásico es el mineral más común en la roca con coloración rosada, ligeramente alterado y con cristales de tamaños muy variados desde 2cm hasta 1mm. El cuarzo se encuentra en cristales blanco-grisáceos también bastante presencia en la roca con tamaños variados de 5mm a 1mm. Por otro lado, la plagioclasa se encuentra en menor cantidad, con un color blanco

y tamaños variados de 5mm a 1mm. La sericita está presente como producto de alteración pervasiva en la muestra y exhibe un color blanco y ligeramente verdoso. La muestra también presenta una coloración parda en algunas secciones debido a alteración supérgena de óxidos.

Teniendo en cuenta la información recolectada, se decide hacer un esquema resumido de lo que se contempla en la muestra AR-01. Dicho esquema, ayudará en el proceso de identificación del tipo de roca que se tiene presente.

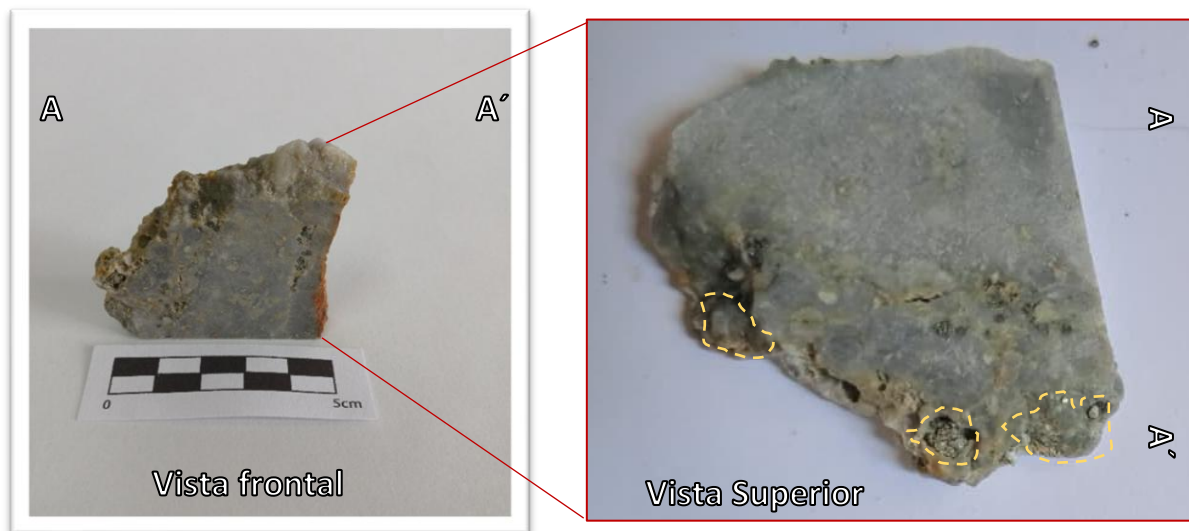
Figura 12. Ficha de resumen de caracterización macroscópica de muestra AR-01.

Nombre: AR-01		
Coordenadas	X = 1.119.101 Y = 1.244.152 Z = 1.144 MSNM	
Color: Pardo rosáceo Textura: Porfídica Minerales a simple vista: Cuarzo (15%), Biotita (5%), Feldespato K (50%), plagioclasa (10%), Sericita (5%) Breve descripción: Roca de origen hipoabisal con superficies con fracturación subparalela leve.		

5.2.2 Muestra AR-2

La muestra corresponde a una roca de textura maciza, con coloración general que varía de gris verdosa a gris claro. Hacia los bordes se identifican zonas con tonalidades más oxidadas, lo cual sugiere la acción de procesos de oxidación superficial asociados a alteración supérgena. La roca presenta una matriz densa de carácter microcristalino, en la cual se reconocen sistemas de fracturas parcialmente rellenas por óxidos de hierro y/o minerales secundarios de alteración, evidenciando la circulación tardía de fluidos a lo largo de planos de debilidad.

Figura 13. Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2.



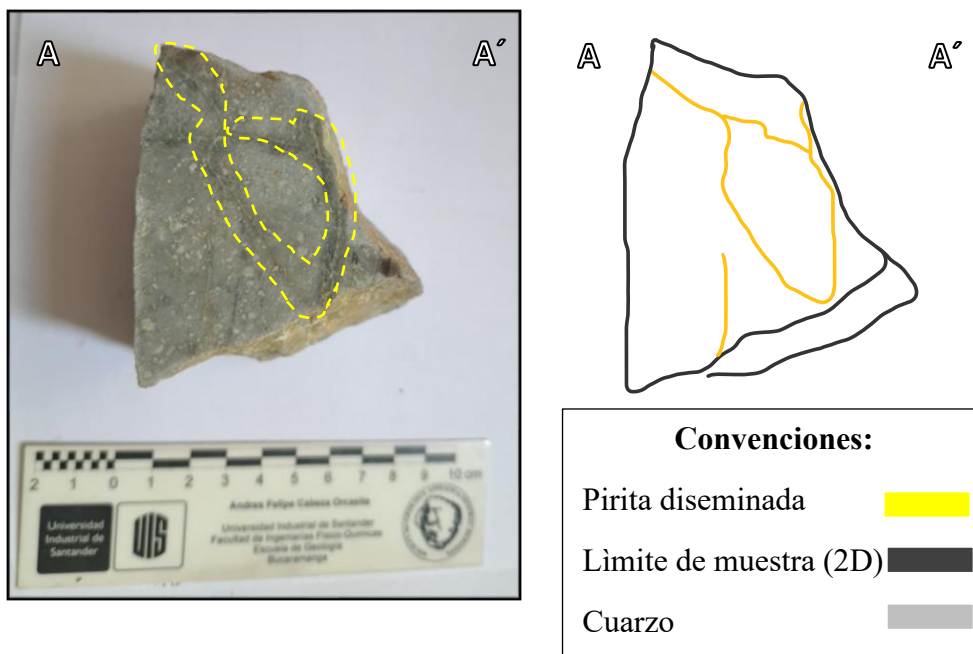
A nivel macroscópico, la muestra presenta una asociación mineral compuesta principalmente por sericita, cuarzo, moscovita y pirita. La sericita se encuentra ampliamente distribuida en la muestra, presentándose como una fase microcristalina de color blanco a ligeramente verdoso, característica de procesos de alteración hidrotermal de tipo filico.

Asimismo, se identifican cristales de cuarzo de coloración blanca a grisácea, con tamaños variables que oscilan entre aproximadamente 1 cm y 1 mm, los cuales constituyen una proporción significativa de la composición total de la roca. La moscovita se encuentra presente en menor

proporción, exhibiendo su color plateado característico con brillo nacarado, y tamaños cristalinos que varían entre 5 mm y 1 mm.

La pirita se reconoce por su color amarillo latón y hábito cúbico bien desarrollado, con tamaños cristalinos variables entre 8 mm y 1 mm. Este mineral se distribuye de manera diseminada a lo largo de la muestra, aunque también se concentra localmente rellenando sistemas de fracturas, lo cual sugiere una precipitación controlada estructuralmente (Figura 13). Adicionalmente, se observa la presencia de texturas tipo *boxwork*, desarrolladas en una etapa tardía como resultado de procesos de alteración supérgena de la pirita, las cuales se manifiestan como estructuras residuales delimitadas en la muestra (Figura 13).

Figura 14. Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2. Venas o grietas presentes.



En la Figura 14 se reconoce de manera representativa la presencia de posibles concentraciones de pirita diseminada, identificables por sus tonalidades amarillo-latón, las cuales se encuentran finamente distribuidas y encapsuladas dentro de una matriz predominantemente

cuarzosa. Esta relación textural sugiere una mineralización sulfídea diseminada, potencialmente asociada a eventos hidrotermales previos.

Figura 15. Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2. Presencia de Arcilla.

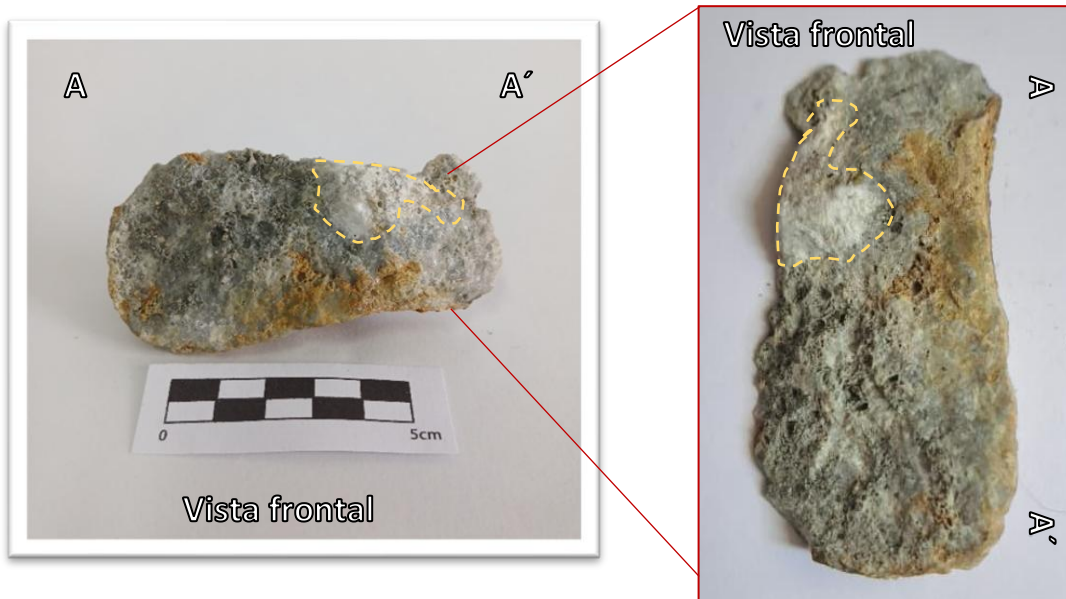
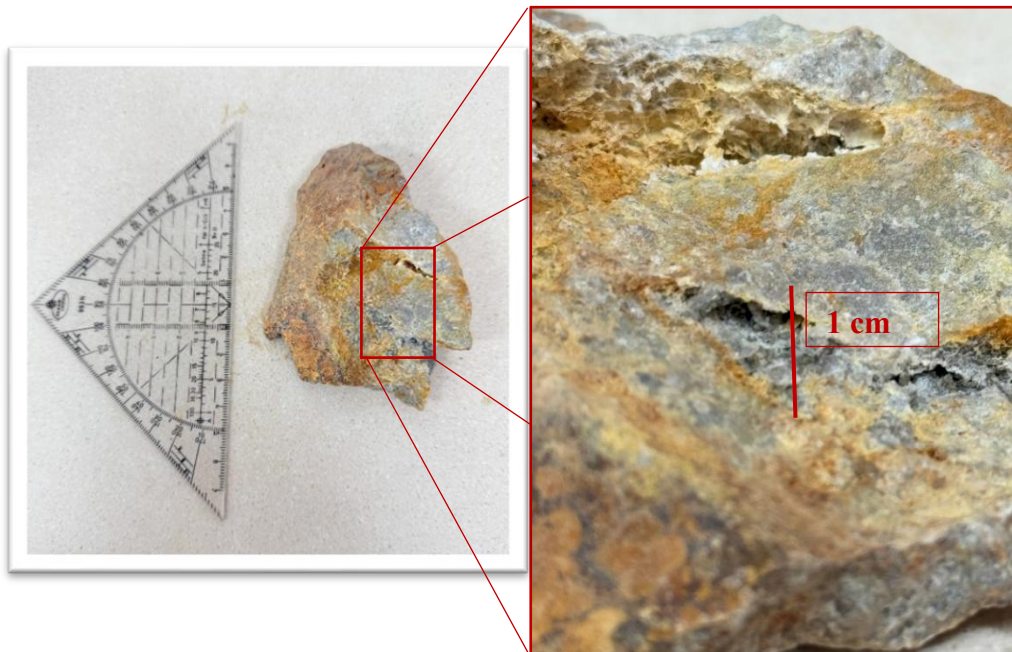


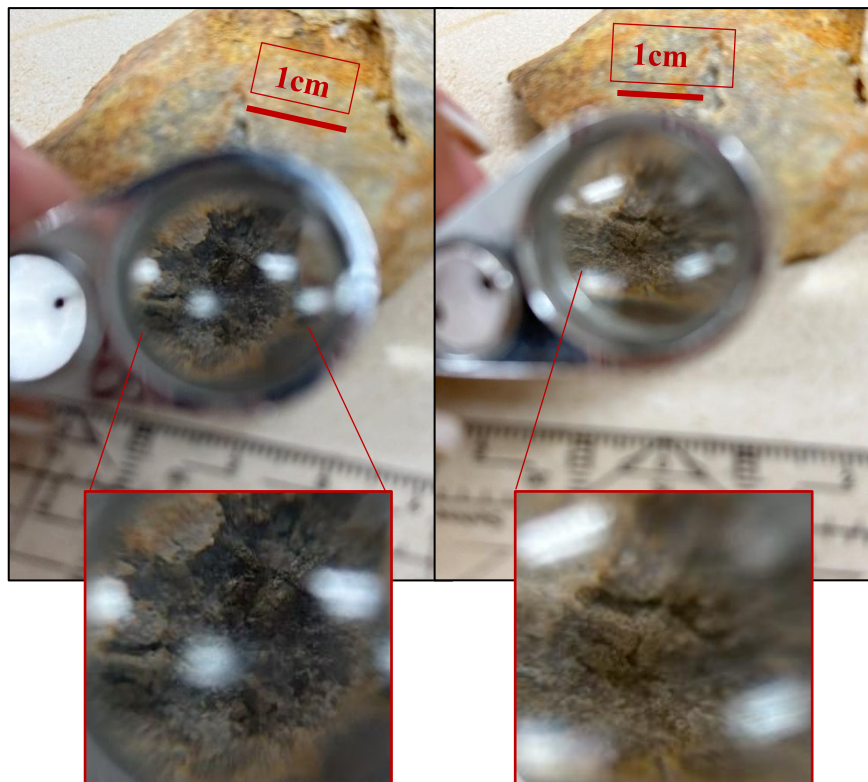
Figura 16. Muestras AR-02, roca alterada extraída en Parada 2.



De manera complementaria, en algunas muestras se evidencia la presencia de posibles fases arcillosas secundarias, caracterizadas por coloraciones blanquecinas a cremosas (Figura 15), las cuales podrían corresponder a minerales del grupo de las arcillas generados por procesos de alteración supergénica.

Su color dominante representa tonos grisáceos, verdosos pálidos, ocre y amarillentos (óxidos). Presenta una textura masiva, sin orientación evidente. Contiene vesículas rellenas o parcialmente rellenas. Superficies externas con costras amarillas o rojizas.


Figura 17. Muestras AR-2, roca alterada extraída en Parada 2, vista con Lupa 10X.



Teniendo en cuenta la información recolectada, se decide hacer un esquema resumido de lo que se contempla en la muestra AR-02.

Figura 18. Ficha de resumen de caracterización macroscópica de muestra AR-02.

Nombre: AR-02	
Coordenadas	X = 1.119.946 Y = 1.243.720 Z = 1.088 MSNM
Color: Tonos grisáceos a verdosos pálidos.	
Textura: Masiva, sin dirección.	
Minerales a simple vista: Cuarzo, sericita, pirita, clorita.	
Breve descripción: Ausencia clara de fenocristales, pero con relictos texturales que sugieren una matriz microgranular.	



5.3 Análisis petrográfico

5.3.1 Muestra AR-1

Figura 19. Sección delgada muestra AR-01 en 5X, punto 1.

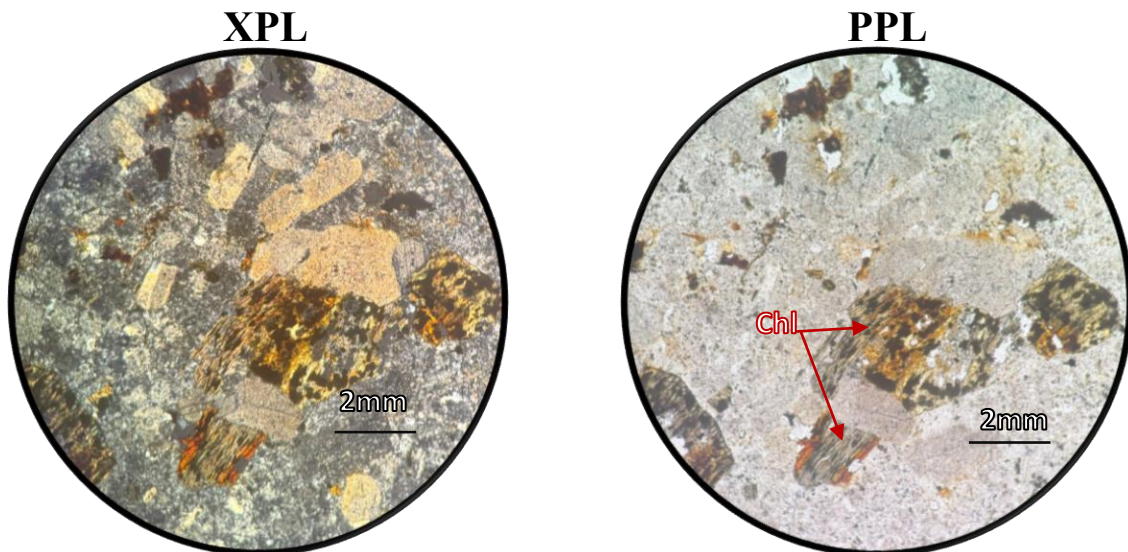
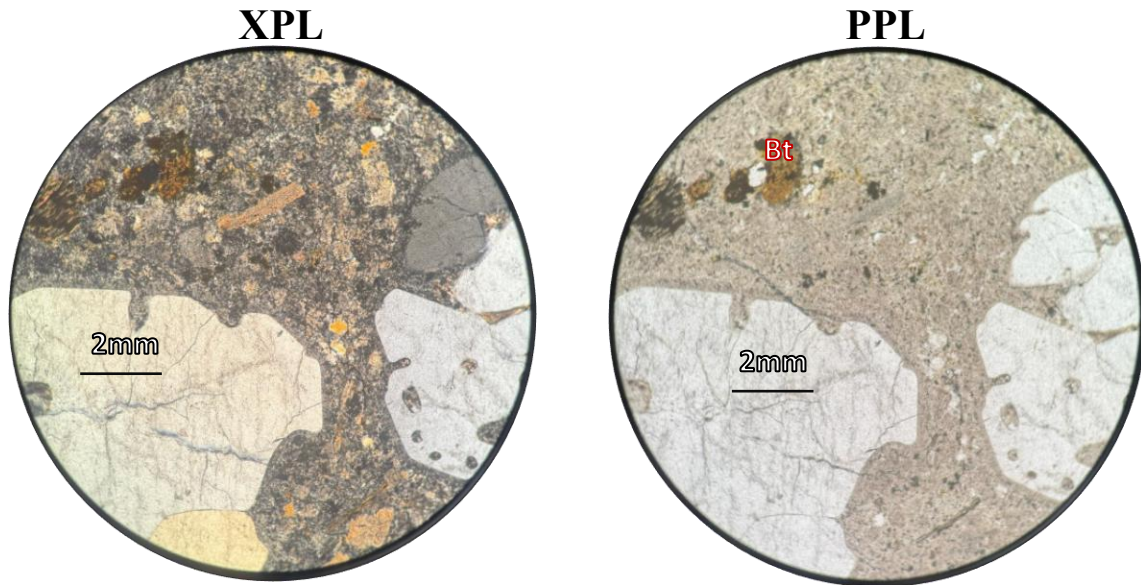


Figura 20. Sección delgada muestra AR-01 EN 5X, punto 2.



La muestra ígnea analizada está constituida mineralógicamente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, con minerales secundarios como sericita, clorita y óxidos de hierro.

El cuarzo se presenta en cristales de tamaño medio a grueso, subhedrales, incoloros bajo nicoles paralelos (PPL) y con colores de interferencia grisáceos de primer orden bajo nicoles cruzados (XPL). De manera adicional, se reconoce la presencia de cuarzo secundario de origen hidrotermal, caracterizado por granos de menor tamaño, que se disponen rellenando microfracturas o intersticios entre los minerales primarios.

El feldespato potásico aparece en cristales subhedrales, generalmente alargados, incoloros en PPL y con colores de interferencia grises de primer orden en XPL. Estos cristales se encuentran intensamente alterados a sericita, la cual se manifiesta como agregados micáceos finos que reemplazan parcial a totalmente al feldespato, evidenciando un proceso de sericitización asociado a alteración hidrotermal.

La biotita se observa en cristales subhedrales a anhedrales, con coloración marrón pálida en PPL, pleocroísmo fuerte y relieve alto. En XPL exhibe colores de interferencia de segundo orden, predominantemente en tonalidades amarillas, anaranjadas y violetas. Parte de la biotita se encuentra parcial a totalmente reemplazada por clorita, la cual corresponde a un producto de alteración secundaria.

La clorita presenta coloración verde claro en PPL, con pleocroísmo débil a moderado, y en XPL muestra colores de interferencia de primer orden, principalmente amarillos y anaranjados, aunque algunos cristales exhiben colores de interferencia anómalos, característicos de este mineral. Esta asociación sugiere un proceso de cloritización vinculado a condiciones hidrotermales tardías o retrógradas.

Adicionalmente, se identifican óxidos de hierro de coloración anaranjado-parda, dispuestos de forma irregular y sin rasgos cristalográficos definidos, los cuales se interpretan como el resultado de procesos de alteración supérgena, asociados a la oxidación de minerales ferromagnesianos preexistentes.

5.3.2 Muestra AR-2

Figura 21. Sección delgada muestra AR-02 EN 5X, punto 1.

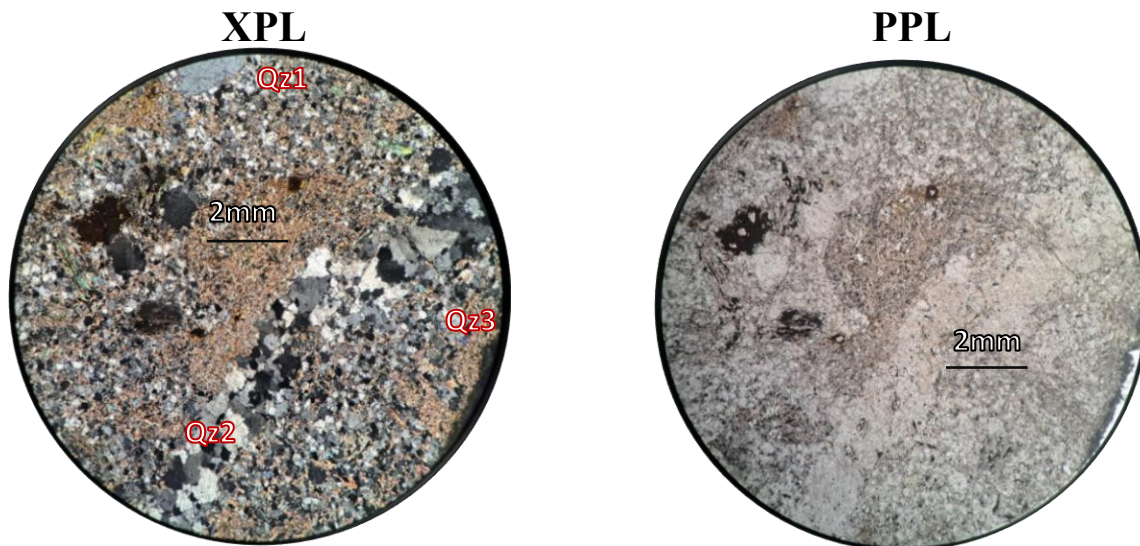
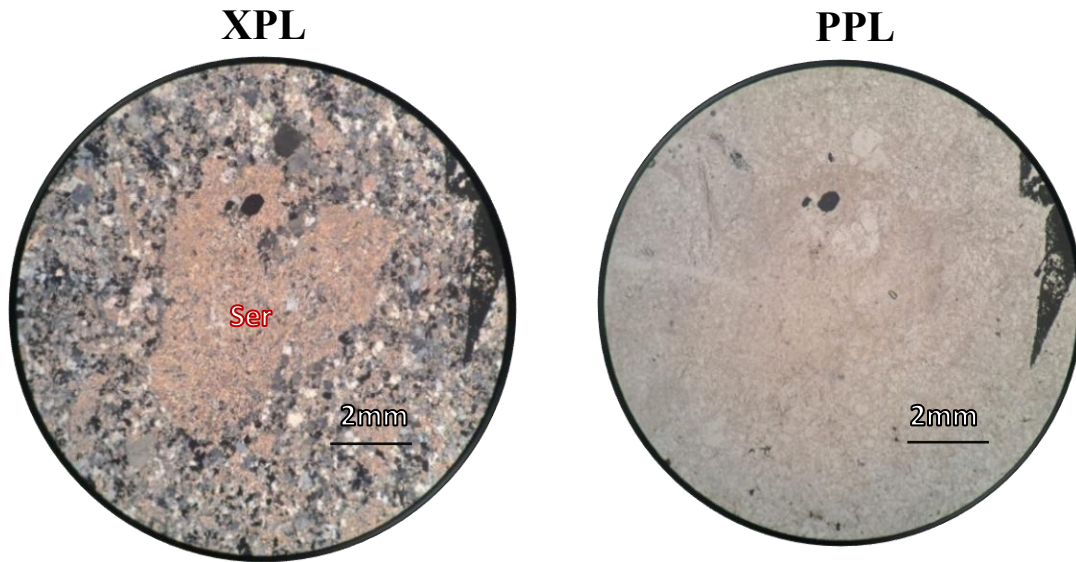


Figura 22. Sección delgada muestra AR-02 EN 5X, punto 2.



La muestra correspondiente a la roca alterada está compuesta mineralógicamente por cuarzo, sericita, moscovita, circón y óxidos de hierro, evidenciando una intensa sobreimpresión hidrotermal y procesos de alteración posteriores.

El cuarzo se reconoce en tres generaciones textural y genéticamente diferenciables. La primera generación corresponde a cristales de gran tamaño, subhedrales, incoloros bajo nicols paralelos (NP) y con colores de interferencia predominantemente grises de primer orden bajo nicols cruzados (NC). Estos cristales se interpretan como relictos de la fase magmática primaria de la roca.

La segunda generación de cuarzo está constituida por cristales de menor tamaño, igualmente incoloros en NP y con colores de interferencia blancos a grisáceos de primer orden en NC. Este cuarzo se presenta íntimamente asociado e intercrecido con sericita, la cual se encuentra diseminada a lo largo de la muestra, lo que sugiere un origen hidrotermal vinculado a procesos de sericitización.

La tercera generación de cuarzo se dispone formando venas de cuarzo-pirita y venas de cuarzo monominerálicas, caracterizadas por una textura homogénea. Este cuarzo es incoloro en NP y exhibe colores de interferencia grises de primer orden en NC. Las venas cortan de manera discordante la mineralogía y texturas preexistentes y no presentan halos de alteración bien definidos, lo cual sugiere su formación durante un evento hidrotermal tardío, posterior a la alteración principal de la roca.

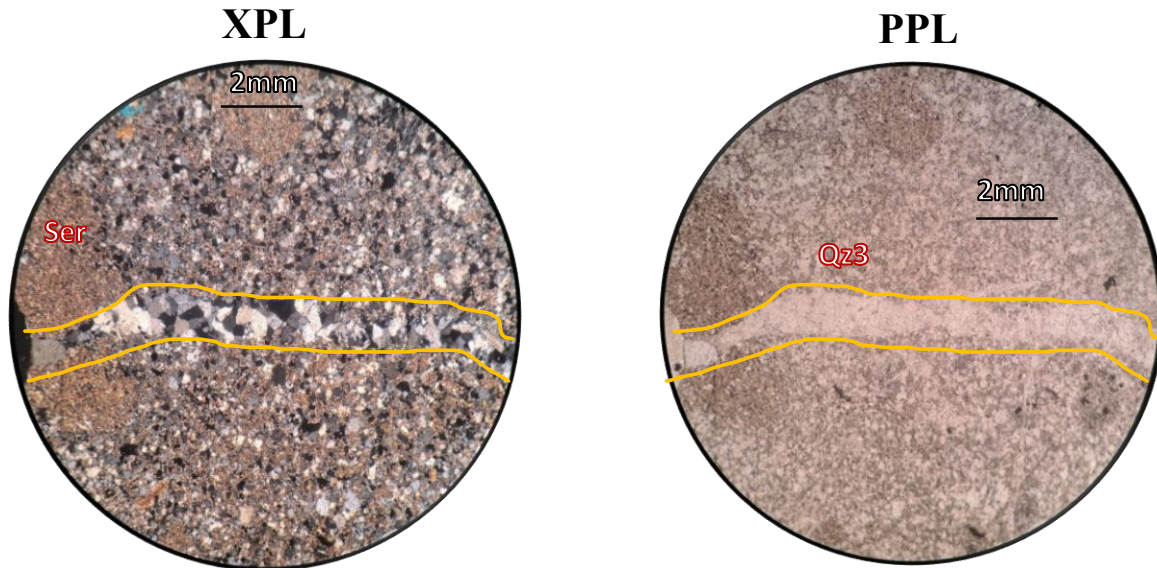
La moscovita se presenta en cristales subhedrales, alargados y de tamaño considerable, alcanzando aproximadamente 4 mm de longitud. Es incolora en NP y muestra colores de interferencia de segundo orden, predominantemente en tonalidades azules y amarillas en NC. La mayoría de los cristales de moscovita se encuentran parcialmente reemplazados por sericita, la cual se distingue por su textura microcristalina en agregados finos, en contraste con el mayor tamaño cristalino de la moscovita, evidenciando un proceso progresivo de sericitización.

La sericita constituye uno de los minerales dominantes de la muestra, presentándose como agregados microcristalinos ampliamente distribuidos, producto de la alteración hidrotermal de feldspatos y micas primarias, característica de condiciones de alteración filica.

El circón se identifica en escasos cristales relictos asociados a la fase magmática original de la roca. Estos cristales presentan formas subhedrales, relieve alto, fracturas internas y, en algunos casos, hábito tabular, con tamaños aproximados de hasta 2 mm. En NP exhiben una coloración marrón pálida, mientras que en NC presentan colores de interferencia de alto orden, principalmente azules y violetas de tercer orden, consistentes con su naturaleza altamente birrefringente.

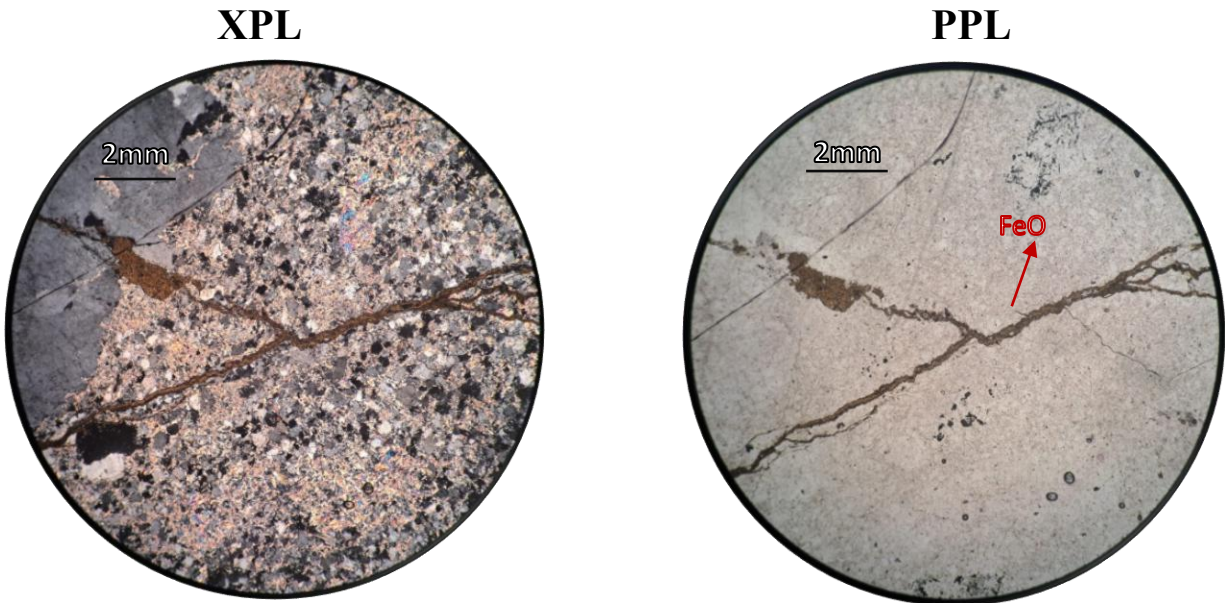
Finalmente, se reconoce la presencia de óxidos de hierro, dispuestos principalmente rellenando fracturas y en sectores de la muestra con texturas difusas y sin rasgos cristalográficos definidos. Estos minerales se interpretan como productos de alteración supérgena, asociados a la oxidación secundaria de fases preexistentes durante procesos de meteorización.

Figura 23. Sección delgada muestra AR-02 en 5X, vena de cuarzo.



Las venas de cuarzo observadas en la muestra AR-02 exhiben una textura masiva y de tipo blocky, caracterizándose por ser generalmente homogéneas. Teniendo en cuenta estas características las venas parecen ser sintaxiales, sin embargo, no se observa un crecimiento desde los bordes hacia la zona central de las venas en las muestras analizadas.

Figura 24. Sección delgada muestra AR-02 en 5X, fracturas de óxido de Hierro



Las vetas de cuarzo observadas en la muestra AR-02 exhiben una textura masiva y de tipo blocky, caracterizándose por ser generalmente homogéneas. Teniendo en cuenta estas características las venas parecen ser sintaxiales, sin embargo, no se observa un crecimiento desde los bordes hacia la zona central de las venas en las muestras analizadas.

5.4 Análisis difracción de rayos X (DR-X)

5.4.1 Muestra AR-01

Para el análisis por Difracción de Rayos X (DRX) se empleó una fracción pulverizada de la muestra AR-01, con el propósito de precisar y corroborar su composición mineralógica. Los difractogramas obtenidos en formatos “raw” y “xy” fueron procesados e interpretados mediante software especializado para el análisis de firmas cristalográficas, lo que permitió una identificación más confiable de las fases minerales presentes en la muestra.

La interpretación de los patrones de difracción se realizó utilizando los programas DIFFRAC.EVA (en la sala de cómputo de la sede UIS Guatiguará) y PROFEX (mediante recursos propios). Ambos softwares arrojaron resultados altamente consistentes y concordantes, tanto en la

identificación de fases minerales como en la posición e intensidad relativa de los picos característicos.

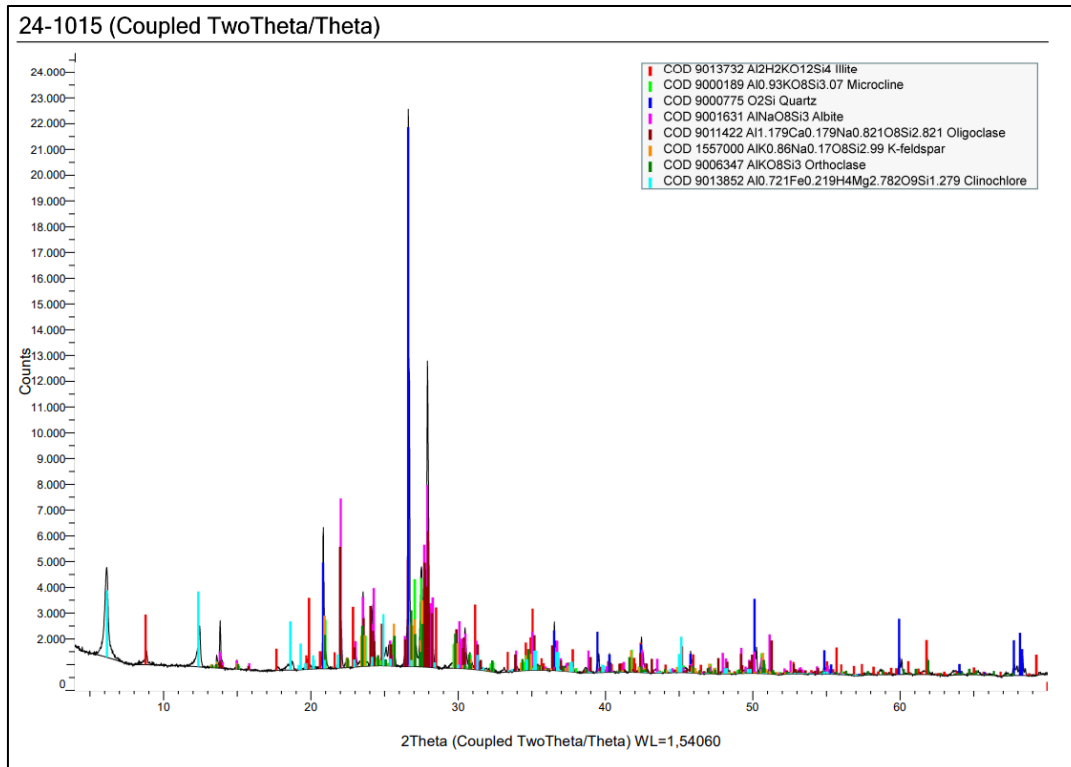
La alta similitud entre los resultados obtenidos con ambos programas permitió validar la interpretación mineralógica, conduciendo a los resultados finales que se presentan en las Figuras 25 y 26.

Figura 25. Resultados obtenidos de AR-01 en Softwares PROFEX y DIFFRAC.EVA, respectivamente.



Nota: En ambos procesos del respectivo análisis de los resultados del estudio de DRX, se usaron filtros de atlas mineralógico y postumo a ello, se filtró mineral por mineral según los encontrados en los análisis macroscópicos y microscópicos.

Figura 26. Patrón de difracción de rayos X (DR-X) de muestra AR-01.



El análisis por DRX permitió una caracterización mineralógica más precisa y detallada de las fases previamente reconocidas. Se identificó una abundante presencia de cuarzo, representado por el conjunto de picos de mayor intensidad, destacándose el pico señalado en color azul oscuro, lo cual confirma su predominio en la muestra.

De manera subordinada, se reconoció la presencia de feldespatos, correspondientes tanto a plagioclasa sódica (albita) como a feldespato potásico, representado por las fases ortoclase y, en proporción similar, microclina. La coexistencia de estas fases feldespáticas es coherente con una roca de afinidad ígnea félsica.

Adicionalmente, el análisis reveló la presencia de minerales secundarios asociados a procesos de alteración hidrotermal, entre los que se identifican clorita, clasificada como

clinocloro, y ilita. Estas fases minerales se interpretan como productos de alteración de minerales ferromagnesianos primarios, probablemente biotita, previamente presente en la roca, lo que sugiere la acción de fluidos hidrotermales posteriores al emplazamiento magmático.

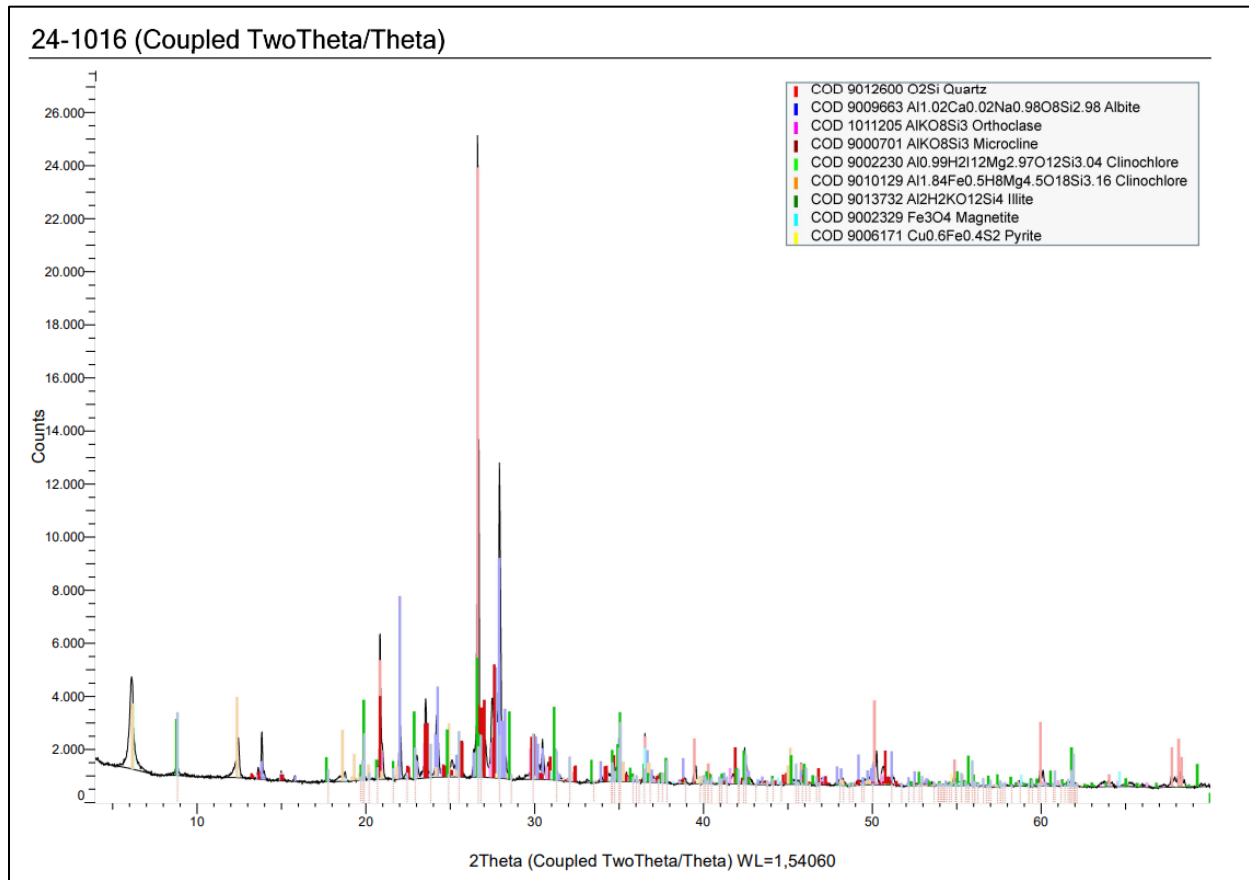
5.4.2 Muestra AR-02

Para este estudio, se utilizó una porción pulverizada de la muestra AR-02 con el objetivo de precisar su composición mineralógica. Al igual que con la muestra AR-01, ambos programas lanzaron datos muy similares, de tal forma que, se llega a los resultados que se muestran en las figuras 27 y 28.

Figura 27. Resultados obtenidos de AR-02 en Softwares PROFEX y DIFFRAC.EVA, respectivamente.



Figura 28. Patrón de difracción de rayos X (DR-X) de muestra AR-02.



El análisis permitió, igualmente, una caracterización mineralógica más precisa de las fases previamente reconocidas mediante petrografía y observación macroscópica. Se identificó una presencia significativa de cuarzo, representada por los picos de mayor intensidad, destacándose el pico señalado en color rojo claro, lo cual confirma su carácter dominante en la muestra.

En menor proporción, se reconoció la presencia de plagioclasa, identificada específicamente como albita, así como feldespatos potásicos, representados por las fases ortoclase y microclina, lo cual es consistente con una litología de composición félsica.

Adicionalmente, se evidencia de manera representativa la presencia de sericita, identificada mediante la fase illita, lo cual concuerda con lo previamente observado tanto en

secciones delgadas como en muestras de mano, y refuerza la interpretación de procesos de alteración hidrotermal, particularmente de tipo filico.

En menor proporción, se detectaron minerales opacos como pirita, la cual, si bien presentan una identificación limitada en sección delgada debido a su comportamiento óptico, es reconocible de forma más clara en observación macroscópica, siendo la pirita el sulfuro mejor identificado a lo largo del estudio.

6. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan que en el sector SW del Macizo de Santander afloran cuerpos ígneos de composición riolítica (AR-01) con signos de alteración hidrotermal incipiente, y zonas localizadas de alteración más intensa (AR-02), caracterizadas por asociaciones minerales típicas de ambientes hidrotermales tipo filico.

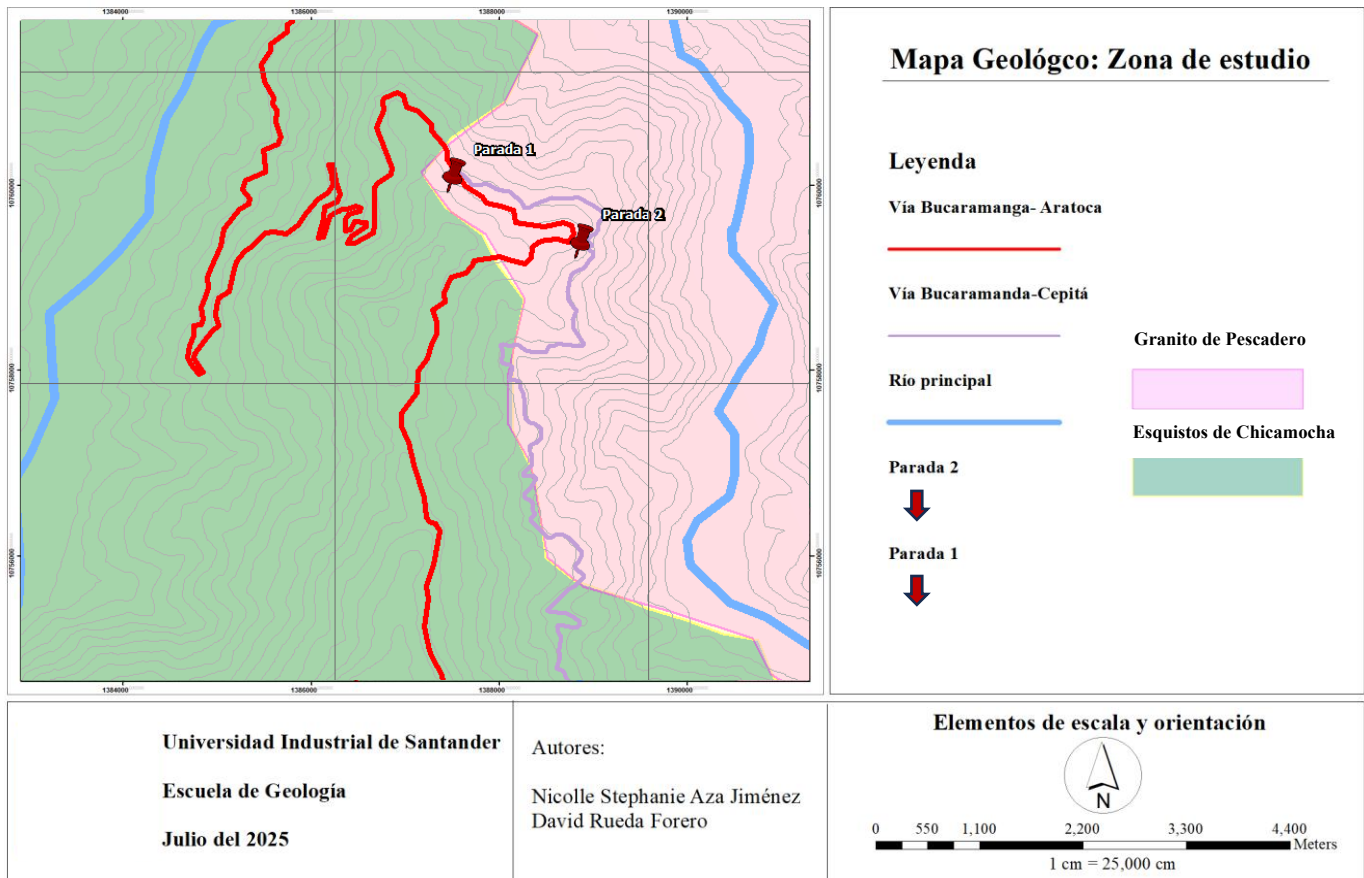
Al comparar las litologías encontradas en la zona de estudio con las reportadas anteriormente (Ward *et al.* 1973; Mantilla *et al.*, 2016a), hay un disenso con respecto a las rocas aflorantes en este tramo, ya que esta zona fue previamente descrita como rocas metamórficas asociadas al evento orogénico Famatiniano (~480 Ma) sin embargo, la muestra AR-01 fue identificada como una Riolita porfirítica, asociada al magmatismo triásico jurásico, por lo que su límite debería estar más elevado topográficamente.

El granito de Pescadero, litología predominante en la zona de estudio, forma parte del Grupo Plutónico de Santander, de edad mesozoica (Triásico tardío–Jurásico temprano) y geoquímica de arco continental (Mantilla *et al.*, 2013). Sin embargo, esto no define el origen del sistema hidrotermal debido a que el magmatismo jurásico-triásico presenta anomalías negativas

en europio en estudios geoquímicas de REE realizados por Mantilla *et al.*, 2013 en rocas no adakíticas, lo que lo define como un magma con poca concentración de agua. Por lo que se sugiere que el origen de este evento hidrotermal corresponde a un evento magmático posterior en el macizo de Santander.

La interpretación paragenética propuesta permite vincular la evolución de la muestra con un contexto regional donde la actividad tectonomagmática paleógena y la presencia de estructuras mayores jugaron un papel fundamental en el control de los fluidos y en la localización de alteraciones (Sillitoe, 2010; Corbett & Leach, 1998).

Figura 29. Propuesta de mapa geológico local, basado y editado de la Plancha 5-06, escala 1:500.000, Atlas geológico de Colombia (2023), SGC.



Así mismo, se puede inferir que, según los datos obtenidos respecto a la mineralización presente en las muestras, se determina un potencial serie de contextos paragenéticos que definen el proceso evolutivo de las muestras de interés AR-02 (Rocas alteradas).

Tabla 2. Contextos paragenéticos con base a eventos de Alteraciones Hidrotermales históricos.

Eventos Mineralogía	Magmático	Alteración Propilítica	Alteración Fílica	Alteración Supérgena
	Cuarzo	—————	—————	—————
Biotita	.....	.....
Feldespató k	—————	- - - - -		
Plagioclasa	.....		
Pirita			- - - - -	- - - - -
Zircón	.....	.....	.....	.....
Illita		- - - - -	—————	—————
Moscovita	.....	.....	.....	.....
Óxidos de Hierro				- - - - -
Clorita		- - - - -		
Convenciones	————— Muy abundante	- - - - - Regulado	..... Poco abundante	

Fase magmática

La primera fase analizada principalmente en la muestra AR-01 y teniendo en cuenta algunos relictos de AR-02, corresponde a la etapa magmática donde la litología reconocida es una riolita porfídica caracterizada por fenocristales inmersos en una matriz félsica como se mencionó en apartados anteriores. La composición mineral durante esta etapa es cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, moscovita, biotita como minerales más abundantes y circón como accesorio.

Alteración propilítica

Previo al evento de alteración filica, se reconoce un episodio de alteración propilítica, caracterizado por la presencia de clorita (Clinocloro), cuarzo y minerales arcillosos del tipo illita, identificados en las muestras analizadas. Este tipo de alteración es típico de sistemas hidrotermales asociados a intrusivos, desarrollándose bajo condiciones de temperaturas moderadas, fluidos de composición relativamente neutra y menor acidez en comparación con la alteración filica (Pirajno, 2009).

La asociación mineralógica: cuarzo, clorita, albita y relictos de feldespato potásico y biotita son consistentes con la alteración propilítica según Seedorff *et al.*, 2005. La presencia de illita puede estar relacionada tanto con la alteración de feldespatos como con la transformación progresiva de fases arcillosas previas, lo cual es común en ambientes propilíticos desarrollados en zonas externas o tardías de sistemas hidrotermales (Pirajno, 2009).

La distribución y paragénesis de las alteraciones observadas en el área de estudio sugieren una evolución hidrotermal coherente con los modelos clásicos de sistemas tipo pórfido. En este contexto, la alteración propilítica se interpreta como un evento temprano y distal, formado de manera sincrónica a la fase de máxima progradación del sistema. Según Sillitoe (2010), esta

alteración se desarrolla en los márgenes del sistema donde fluidos de origen magmático se mezclan con aguas meteóricas en condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino.

Por el contrario, la alteración filica (cuarzo-sericítica) exhibe evidencias de ser un evento posterior y sobreimpuesto. La presencia de texturas de reemplazo, donde la sericita y el cuarzo obliteran asociaciones de minerales previos (como la clorita o la epidota propias de la zona propilítica), indica un fenómeno de colapso hidrotermal. Este proceso ocurre cuando el sistema térmico se debilita, permitiendo que fluidos de carácter más ácido y de menor temperatura asciendan o se infiltren hacia el núcleo del depósito, destruyendo los feldespatos y máficos formados anteriormente (Pirajno, 2009).

En consecuencia, mientras que la alteración propilítica representa el límite exterior del sistema en equilibrio térmico, la alteración filica marca una etapa de retrogradación hidrotermal. Esta secuencia temporal es crítica para la interpretación metalogénica, ya que el evento filico suele actuar como un mecanismo de removilización o enriquecimiento de metales base y preciosos capturados en etapas más tempranas (Corbett & Leach, 1998).

Alteración QSP.

De las muestras estudiadas, se determinó alteración filica para la muestra AR-02 según su composición mineralógica. Esta alteración reemplaza casi de manera total los minerales relictos. La roca exhibe una coloración blanca-gris claro debido a que está compuesta por abundante cuarzo, sericita y en menor medida relictos de moscovita. Los minerales más abundantes en la roca se forman a partir de la hidrólisis de feldespato potásico y plagioclasas principalmente (Sillitoe, 2010)

La tercera fase corresponde al desarrollo de una alteración hidrotermal tipo cuarzo-sericita-pirita (QSP), asociada a la interacción prolongada entre fluidos ácidos y el protolito

original. La formación de sericita fina por toda la roca (diseminada) y ausencia de la gran mayoría de minerales indica metasomatismo que sericitizó por completo la roca original dejando algunos relictos como moscovita y circón, pero aún se conserva la textura original porfírica de la roca donde aún se distingue la forma de los feldespatos cubiertos por illita.

Esta etapa modifica profundamente la composición de la roca precipitando pirita por el alto contenido de S en los fluidos. Según Seedorf *et al.*, 2005. La alteración filica se desarrolla en los sistemas de pórfido a medida que los fluidos evolucionan de altas temperaturas y baja acidez a temperaturas más bajas y mayor acidez.

Alteración supérgena

Finalmente, durante la etapa más tardía de la evolución del sistema, la roca fue afectada por procesos de alteración supérgena, asociados a meteorización y a las condiciones de interperie. Estos procesos generaron modificaciones texturales y composicionales de baja intensidad, producto de la interacción con fluidos meteóricos oxigenados (Sillitoe, 2010).

Los principales productos minerales asociados a esta etapa corresponden a fases arcillosas y óxidos de hierro, los cuales se interpretan como el resultado de la oxidación y lixiviación de sulfuros preexistentes, particularmente pirita. Los productos de alteración férrica habrían migrado a través de las fracturas de la roca (Figura 12), favoreciendo la precipitación secundaria de óxidos y la formación de texturas tipo boxwork, desarrolladas en zonas donde previamente se había producido la mineralización sulfurada (Pirajno, 2009).

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman la presencia de alteraciones hidrotermales en el área objeto de investigación, cuya afinidad conceptual con sistemas magmático-hidrotermales tipo pórfido resulta consistente con el contexto geológico general del Macizo de Santander. No obstante, las características mineralógicas y texturales observadas en las muestras analizadas no permiten establecer una correlación directa ni con el sistema hidrotermal tipo pórfido del distrito Vetas-California, de edad Neógena, ni con el sistema reportado en el tramo Mogotes-San Joaquín, preliminarmente asociado a eventos de edad Jurásica. En este sentido, la ausencia de asociaciones minerales diagnósticas y de óxidos característicos de dichos sistemas sugiere que la alteración identificada en el área de estudio podría corresponder a un evento hidrotermal distinto, cuya naturaleza y temporalidad aún no han sido claramente establecidas.

Las anomalías negativas de europio reportadas para este magmatismo no adakítico sugieren un magma con bajo contenido de agua, condición poco favorable para el desarrollo de sistemas hidrotermales. En este contexto, no se puede determinar el origen del evento hidrotermal, pero se sugiere que este estaría asociado a un pulso magmático posterior en el Macizo de Santander, distinto al magmatismo jurásico-triásico previamente reconocido.

La integración del análisis petrográfico, macroscópico y DRX permitió corroborar las asociaciones mineralógicas observadas y delimitar las zonas más alteradas, aportando insumos claves para la elaboración de un modelo preliminar del sistema paleohidrotermal.

La muestra AR-02 presenta evidencias de una alteración hidrotermal más intensa, con presencia de cuarzo recristalizado, sericita, clorita y pirita diseminada, lo que sugiere condiciones asociadas a alteración filica, compatible con la circulación de fluidos sulfurados.

8. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y considerando que muchas de las interpretaciones realizadas en el presente estudio son de carácter preliminar o hipotético, se proponen a continuación una serie de recomendaciones orientadas a fortalecer la precisión y el alcance de futuras investigaciones en la zona de estudio:

Ampliar la cobertura del muestreo tanto en superficie como en profundidad. Es conveniente realizar un muestreo más sistemático y denso a lo largo del área evaluada, incluyendo perforaciones someras. Esto permitiría una mejor caracterización de las unidades litoestratigráficas y de los patrones de alteración hidrotermal, facilitando una interpretación más robusta del sistema geológico presente.

Realizar dataciones isotópicas de unidades magmáticas y productos de alteración. Con el fin de establecer la cronología relativa y absoluta de los eventos magmáticos e hidrotermales, se recomienda aplicar técnicas de datación radiométrica, como U-Pb en circones o Ar-Ar en micas y feldespatos. Esto contribuiría a una mejor contextualización tectono-magmática del sector suroccidental del Macizo de Santander.

Implementar estudios de inclusiones fluidas. El análisis de inclusiones fluidas en minerales transparentes (como cuarzo o calcita) permitiría estimar parámetros fisicoquímicos como la temperatura, salinidad y presión de los fluidos hidrotermales.

Se recomienda la realización de estudios mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en las muestras representativas del área de estudio. La aplicación de esta técnica permitiría una caracterización mineralógica y textural de mayor resolución, particularmente en aquellas fases

finas o criptocristalinas que no son fácilmente identificables mediante microscopía óptica convencional. Mediante SEM sería posible discriminar con mayor precisión la morfología, distribución y asociaciones de sulfuros diseminados, así como identificar microtexturas diagnósticas de origen hidrotermal, tales como reemplazos, sobrecrecimientos y relleno de microfracturas.

Referencia Bibliográficas

- Bissig, T., Mantilla, L. C., & Hart, C. (2014). Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (–Mo, Au) metallogeny. *Lithos*, 200-201, 355-367.
- Boinet, T., Bourgois, J., Mendoza, H., & Vargas, R. (1989). La Falla de Bucaramanga (Colombia): su función durante la Orogenia Andina. *Geología Norandina*, 3-10.
- Browne, P. (1978). Hydrothermal Alteration in Active Geothermal Fields. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 6(1), 229-248. Doi:10.1146/annurev.ea.06.050178.001305
- Cediel, F., Shaw, R., & Caceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. *AAPG*, 79, 815-848.
- Corbett, G., & Leach, T. (1998). Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization (Vol. 6). Society of Economic Geologists.
- Diederix, H., Hernández, C., Torres, E., Osorio, J., & Botero, P. (2009). Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la falla de Bucaramanga, Colombia. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 18-23.
- Dörr, W., Grösser, J., Rodriguez, G., & Kramm, U. (1995). Zircon U-Pb age of the Paramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 8, 187-194.
Doi:[https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00004-Y](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00004-Y)

- Duque, H. (1980). Geotécnica y evolución de la región noroccidental colombiana. *Boletín Geológico*, 23(3), 4-37.
- Galvis, M., Velandia, F., & Villamizar, N. (2014). Cartografía morfoestructural de la falla de Bucaramanga: Geometría lenticular a lo largo del valle del río Chicamocha en Santander - Colombia.
- Gamboa, J. A. (2016). Estudio de las alteraciones hidrotermales asociadas a sistemas de fallas de dirección Noreste en el Batolito de Mogotes (sector Mogotes-Alto de los Cacaos: Macizo de Santander). Universidad Industrial de Santander.
- Hedenquist, J., Arribas, A., & Gonzalez, E. (2000). Exploration for Epithermal Gold Deposits. En S. Hagemann, & P. Brown, *Gold in 2000*. Society of Economic Geologists.
- Jiménez, G., Speranza, F., Faccenna, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: Evidence for a ≤ 3 mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 57, 12 - 22.
- Macellari, C. (1984). Late Tertiary tectonic history of the Táchira Depression, southwestern Venezuelan Andes. En C. Macellari, *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. Doi:<https://doi.org/10.1130/MEM162-p333>
- Maksaev, V. (2001). Curso de metalogénesis. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Manosalva-Sánchez, S., Naranjo-Merchán, W., Rios-Reyes, C. A., Amorocho-Parra, R., & Castellanos-Alarcón, O. (2017). Estudio petrogenético de las rocas metamórficas del

- macizo de floresta, cordillera oriental, andes colombianos. *Boletín de geología*, 39, 83-103. Doi:<https://doi.org/10.18273/revbol.v39n1-2017004>
- Mantilla F, L. C., Valencia, V. A., Barra, F., Pinto, J., & Colegial, J. (2009). Geocronología u-pb de los cuerpos porfiríticos del distrito aurífero de vetas-california (dpto de santander, colombia). *Boletín De Geología*, 31.
- Mantilla Figueroa, L. C., Bissig, T., Valencia, V., & Hart, C. J. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district, Santander Massif,. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 235-249. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.03.006>
- Mantilla, L. C., Mendoza, H., Bissing, T., & Craig, H. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo miocénico en el Distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33, 43-45.
- Mantilla-Figueroa, L. C., & García-Ramirez, C. A. (2018). Geología y geocronología de las litologías aflorantes en el tramo Mogotes-San Joaquín (sector SW del Macizo de Santander). *Oletin de Geología*, 40. Doi:<https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018008>
- Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramirez, C. A., & Valencia, V. A. (2016). 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. Doi:<https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016002>
- Mathur, R., Ruiz, J., Herb, P., Hahn, L., & Burgath , K. (2003). Re–Os isotopes applied to the epithermal gold deposits near Bucaramanga, northeastern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 815-821. Doi:[https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00126-8)

Montes, C., Guzmán, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., & Jaramillo, C. (2010).

Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 4, 832-848.

Paris, G., & Romero, J. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín Geológico*, 34(2-3), 4-25.

Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes and mineral systems. Springer.

Rodriguez, A. (2005). Geology, Alteration, Mineralization and Hydrothermal Evolution of the La Bodega-La Mascota deposits, California-Vetas Mining District, Eastern Cordillera of Colombia, Northern Andes. University of British Columbia.

Rodriguez, 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, 7-27. Doi:<https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.1.2022.571>

Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Bogotá: INGEOMINAS.

Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, Jr, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W., . . . Barton, M. D. (2005). Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. *Economic geology*, 251-298. Doi:<https://doi.org/10.5382/AV100.10>

Sillitoe, R. (2005). Supergene Oxidized and Enriched Porphyry Copper and Related Deposits. En J. Hedenquist, J. Thompson, G. Richard, & R. Jeremy, *One Hundredth Anniversary Volume*. Supergene Oxidized and Enriched Porphyry Copper and Related Deposits.

Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105, 3-41.

Doi:<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

Toro, J. (1990). The termination of the Bucaramanga Fault in the cordillera Oriental, Colombia.

The University of Arizona.

Van der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., & Mora, A. (2016). Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans. *Gondwana Research*, 31, 271-294.

Doi:<https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.01.011>

Velandia Patiño, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga.

Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. A. (1974). Geology of quadrangles H-12, H-13, and parts of I-12 and I-13, (zone III) in northeastern Santander Department, Colombia. U.S. Geological Survey. Doi: <https://doi.org/10.3133/ofr74258>.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1 - 3), 1 - 134.

Zapata, G., Correa, A., García, G., & Mejía, M. (2017). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia Granito de pescadero. Catálogos estratigráficos de Colombia.