

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Caracterización de los perfiles de meteorización del Monzogranito de Santa Bárbara y depósito asociado en el Páramo de Berlín, Santander.

Jose David Ponce Betancur

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Directora

María Alejandra Cetina Tarazona

Geóloga, Magíster en Ingeniería Civil

Codirectora

Daniela Cristina Rey Romero

Ing. Ambiental, MSc. en Planificación y Desarrollo de Recursos Hidráulicos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2024

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Dedicatoria

A Dios, por darme paciencia, sabiduría y fuerzas cuando me sentía más derrotado. Por mostrarme como hacer las cosas desde el amor.

A mis padres, Jesús y Yoly, que en ningún segundo de sus vidas han dudado de mí, a ellos que muchas veces sacrificaron comodidad por mis estudios.

A mi hermano menor, Sebastián, por recordarme que debo hacer las cosas de manera ejemplar y con pasión.

A mi abuela Mery, que siempre me mostró un amor incondicional y un apoyo inagotable, sería imposible sin ella.

A toda mi familia, por darme tanto amor y extenderme la mano cada que Dios les permitía.

A mi grupo de amigos “Ilustrados” Egwer, Tara, Fandi, Santi, Marlon, por siempre recordarme lo hermoso que es vivir y el valor de la amistad.

A Joan, el mejor amigo que alguien podría tener, por darme los consejos más sabios y siempre tener un hombro para este servidor.

A Massi, Male, Álvaro y todas aquellas amistades que nunca permitieron que renunciase a mis sueños.

A Dani, por darme su amor y su cariño siempre, sobre todo cuando las cosas se venían abajo.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Geología, al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental-GPH y especialmente a las profesoras María Alejandra Cetina y Daniela Rey por orientarme durante todo el proceso de manera tan atenta y paciente. Igualmente agradezco a Juan por su compañía durante el trabajo de campo, por proporcionarme los datos meteorológicos tomados por el GPH y el uso de sus laboratorios. Agradezco también a Lina María Cetina por su revisión y aportes en el análisis petrográfico.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Localización del área de estudio	14
3. Actividades	15
3.1 Revisión bibliográfica.....	15
3.2 Antecedentes de los suelos de páramo.....	16
3.3 Geología del área de estudio	18
3.4 Análisis de parámetros hidroclimáticos de la zona de estudio	20
3.5 Trabajo de campo.....	22
3.5.1 Estación JDPB-01	24
3.5.2 Estación JDPB-02	28
3.5.3 Estación JDPB-03	30
3.6 Análisis petrográfico.....	33
3.7 Difracción de Rayos X (DRX).....	48
3.8 Análisis e interpretación de resultados	50
3.8.1 Relación de la meteorización con los parámetros hidroclimáticos y el fracturamiento ...	50
3.8.2 Relación de las arcillas identificadas y los procesos de meteorización.....	52
4. Conclusiones.....	57
Referencias Bibliográficas	59

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Apéndices.....	64
----------------	----

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Clasificación de suelos adaptada por Colegial Gutiérrez (2017)</i>	23
Tabla 2 <i>Datos estructurales tomados en la estación JDPB-01</i>	27
Tabla 3 <i>Mineralogía del monzogranito (JDPB-M-01-1)</i>	34
Tabla 4 <i>Mineralogía de la granodiorita (JDPB-M-01-2)</i>	37
Tabla 5 <i>Resumen composicional del conteo mineral (>300 pts/muestra) y su grado de meteorización asociado.</i>	44
Tabla 6 <i>Resultados de Difracción de Rayos X (DRX) de las muestras</i>	48

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Mapa de localización de la zona de estudio</i>	14
Figura 2 <i>Mapa geológico de la zona de estudio y las estaciones de campo</i>	19
Figura 3 <i>Curvas de precipitación mensual de las Estaciones Picacho, Berlín y GPH</i>	21
Figura 4 <i>Gráficos de a) Temperatura media anual histórica de la zona de estudio b) Oscilaciones horarias promedios de la temperatura</i>	22
Figura 5 <i>Fotografía del afloramiento de la estación JDPB-01: Monzogranito de Santa Bárbara (roca parental)</i>	25
Figura 6 <i>Fotografía de la muestra de mano JDPB-M-01-1</i>	26
Figura 7 <i>Fotografía de la muestra de mano JDPB-M-01-2</i>	27
Figura 8 <i>Estereogramas de las diaclasas registradas en campo en la parte superior y la concentración de sus respectivos polos</i>	28
Figura 9 <i>Fotografía de la estación JDPB-02. Suelo desarrollado</i>	29
Figura 10 <i>Fotografías de detalle de la Estación JDPB-02. a) roca completamente meteorizada b) suelo residual</i>	30
Figura 11 <i>Fotografía de la estación JDPB-03. Depósito cuaternario</i>	31
Figura 12 <i>Columna estratigráfica del depósito cuaternario. Elaboración propia</i>	32
Figura 13 <i>Fotografías cercanas a las capas de la Estación JDPB-03: a) arcillas con concentraciones de óxidos b) intercalación de niveles gruesos y -finos</i>	33
Figura 14 <i>Microfotografías del monzogranito (JDPB-M-01-1)</i>	36
Figura 15 <i>Microfotografías de la granodiorita (JDPB-M-01-2)</i>	39

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 16 <i>Microfotografías de la roca completamente meteorizada (JDPB-M-02-1).</i>	41
Figura 17 <i>Microfotografías del depósito cuaternario (JDPB-M-03-1).</i>	42
Figura 18 <i>Microfotografía del depósito cuaternario (JDPB-M-03-2).</i>	43
Figura 19 <i>Diagrama QAP según Streckeisen (1976) de las muestras de roca parental y roca meteorizada</i>	47
Figura 20 <i>Diagrama de clasificación para las muestras del depósito sed., según Pettijohn (1975)</i>	47
Figura 21 <i>Diagrama de la relación clima-meteorización de Louis Peltier</i>	52
Figura 22 <i>Representación esquemática de tres zonas de formación mineral en los suelos</i>	53
Figura 23 <i>Procesos de neoformación y sus productos en la etapa residual</i>	57

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A Difractogramas de las 6 muestras analizadas	64

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Resumen

Título: Caracterización de los perfiles de meteorización del Monzogranito de Santa Bárbara y depósito asociado en el Páramo de Berlín, Santander.*

Autor: Ponce Betancur Jose David

Palabras Clave: Suelos de Páramo, Monzogranito de Santa Bárbara, Meteorización química, Procesos Pedogenéticos, Arcillas

Descripción: Se realizó la descripción de afloramiento de roca fresca y roca meteorizada de la unidad Monzogranito de Santa Bárbara, y de un depósito cuaternario asociado, dentro de una unidad hidrográfica ubicada en el Páramo de Berlín (Santander, Colombia), mediante trabajo de campo, secciones delgadas y difracción de rayos X. La roca fresca presentó dos variedades texturales, gruesa y fina-media, con una mineralogía compuesta de ortoclasa, cuarzo, albita, biotita con alteraciones a clorita, sericita y caolinita. Se identificaron las arcillas de la roca meteorizada y del depósito cuaternario. La roca meteorizada presenta caolinita, sericita, gibbsita, vermiculita y brucita. El depósito cuaternario presenta caolinita, sericita, gibbsita, yeso, vermiculita, brucita y flogopita. La meteorización se está dando bajo precipitaciones de 1200 mm/año y a temperaturas de $\sim 9^{\circ}\text{C}$, lo que clasifica a la unidad hidrográfica como páramo semihúmedo y establecen una meteorización moderada para la zona. La roca fresca se encuentra diaclasada indicando la influencia de las fallas geológicas en la zona que fracturan la roca y en conjunción con las condiciones hidroclimáticas facilitan procesos de meteorización mecánica, como la gelifracción, y la infiltración del agua, que posteriormente favorece la meteorización química de la roca. Se identificaron los principales procesos pedogenéticos: alitización y fer-mono-sialitización. Se encontró que la tendencia geoquímica de los suelos generados sigue la ruta ácida, encontrándose en los afloramientos en su fase residual. Las relaciones entre las arcillas y la mineralogía primaria *a priori* favorecen la disponibilidad en los suelos de NO_3^- , NH_4^+ , H_2PO_4^- , K^+ , Na^+ y Ca^{2+}

Pasantía de Investigación

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, directora: Maria Alejandra Cetina Tarazona, Msc. Codirectora: Daniela Cristina Rey Romero, Msc.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Abstract

Title: Characterization of the weathering profiles of the Santa Barbara Monzogranite and associated deposit in the Páramo de Berlín, Santander.*

Author: Ponce Betancur Jose David

Key Words: Páramo soils, Monzogranito de Santa Bárbara, Chemical Weathering, Pedogenetic processes, Clays

Description: The description of fresh outcrop, weathered rock and Quaternary deposits of the Monzogranito de Santa Barbara unit within a hydrographic unit located in the Páramo de Berlín (Santander, Colombia), was carried out through of field work, thin sections and X-ray diffraction. The fresh rock presented two textural varieties, coarse and fine-medium, with a mineralogy composed of orthoclase, quartz, albite, biotite with alterations to chlorite, sericite and kaolinite. Clays from the weathered rock and Quaternary deposit were identified. The weathered rock shows kaolinite, sericite, gibbsite, vermiculite and brucite. The quaternary deposit has kaolinite, sericite, gibbsite, gypsum, vermiculite, brucite and phlogopite. Weathering is occurring under precipitation of 1200 mm/year and temperatures of $\sim 9^{\circ}\text{C}$, which classifies the hydrographic unit as a semi-humid páramo and establishes moderate weathering for the area. The fresh rock is diaclosed indicating the influence of geological faults in the area that fracture the rock and in conjunction with the hydroclimatic conditions facilitate mechanical weathering processes, such as gelifraction, and water infiltration, which subsequently favors chemical weathering of the rock. The main pedogenetic processes were identified: allitization and fer-mono-siallitization. It was found that the geochemical trend of the generated soils follows the acid trend, being found in the outcrops in their residual phase. The relationships between clays and primary mineralogy a priori favor the availability of NO_3^- , NH_4^+ , H_2PO_4^- , K^+ , Na^+ and Ca^{2+} in the soils.

Research internship

Faculty of Physicochemical Engineering, School of Geology, Director: Maria Alejandra Cetina Tarazona, Msc. Codirector: Daniela Cristina Rey Romero, Msc.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Introducción

En el marco del proyecto de investigación “Análisis del efecto del cultivo de *Allium fistulosum* sobre la dinámica del nitrógeno en los suelos del Páramo de Berlín (Colombia)” financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander (UIS), se desarrolló una pasantía de investigación en el Grupo de Investigaciones en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), cuyo propósito fue caracterizar el material parental que producen los suelos de la zona de estudio, ubicada en el Páramo de Berlín (Santander, Figura 1), donde aflora el Monzogranito de Santa Bárbara y depósitos cuaternarios asociados. Esta zona, hace parte del complejo de páramos Jurisdicciones Santurbán–Berlín desde la resolución 2090 del 2014 y es de importancia crítica en materia hidrológica, de biodiversidad y de producción agrícola en la región (Buytaert et al., 2006; Tovar et al., 2013; Duarte-Abadía & Boelens, 2016).

El término 'material fresco o parental' hace referencia a la roca o depósito que permanece sin cambios debido a la poca o nula influencia de los agentes superficiales. Debido a las propiedades minerales de la roca (que determinan su susceptibilidad a la alteración) y a las condiciones climáticas específicas de las zonas, como por ejemplo las condiciones de páramo, se desarrollan perfiles de meteorización que dan origen a la formación de suelos. En las zonas donde afloran depósitos cuaternarios se añade complejidad debido a la naturaleza estratificada de los mismos, que junto con sus propiedades granulométricas y el estadio diagenético de estos modifican la evolución pedogenética (Dinis et al., 2017). El estudio de los perfiles de meteorización permite comprender la evolución a nivel superficial de los procesos naturales activos más recientes, que moldean el paisaje natural, producen los suelos e influyen en la vegetación y en los microorganismos que allí se desarrollan.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

En el presente trabajo, para un análisis detallado de los perfiles de meteorización se realizó una descripción de afloramientos donde se identificaron los horizontes que abarcan desde la roca fresca hasta el suelo y desde las capas frescas del depósito cuaternario identificado hasta el suelo. Posteriormente, se realizaron diferentes análisis que permitieron determinar la composición mineralógica y química de los afloramientos analizados. Dentro de estos análisis se realizó la petrografía de la roca fresca, de la roca meteorizada y de un depósito cuaternario asociado y análisis de difracción de rayos X para los dos últimos. Se identificaron los minerales (incluyendo los tipos de arcillas) que conforman la roca fresca, la roca meteorizada y el depósito cuaternario y, según sus propiedades, asociaciones y abundancias, se establecieron las reacciones químicas que los alteran y que, en interacción con los factores climáticos, producen los suelos. Así mismo, la caracterización petrográfica de los suelos, permitió identificar las propiedades físicas y químicas de las partículas que los componen, siendo una herramienta importante al momento de entender la formación y desarrollo de suelos. El análisis del suelo brinda herramientas para conocer la aptitud de este para las diferentes actividades agrícolas que podrían o que ya estarían siendo desarrolladas en la zona, de manera que, se potencialice el uso del suelo o se tenga una mejor comprensión de la influencia de este en todo el material orgánico.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar los perfiles de meteorización del Monzogranito de Santa Bárbara producidos en una unidad hidrográfica del Páramo de Berlín (Santander).

1.2 Objetivos Específicos

Describir los perfiles de meteorización de los afloramientos de la zona de estudio a partir de observaciones en campo.

Analizar petrográficamente las rocas del Monzogranito de Santa Bárbara para la identificación de alteraciones presentes en la interfase roca-suelo.

Identificar las principales arcillas de alteración presentes en los perfiles de meteorización en el área de estudio.

Relacionar las condiciones climáticas de la zona con los principales procesos geoquímicos involucrados en la generación de los perfiles de meteorización.

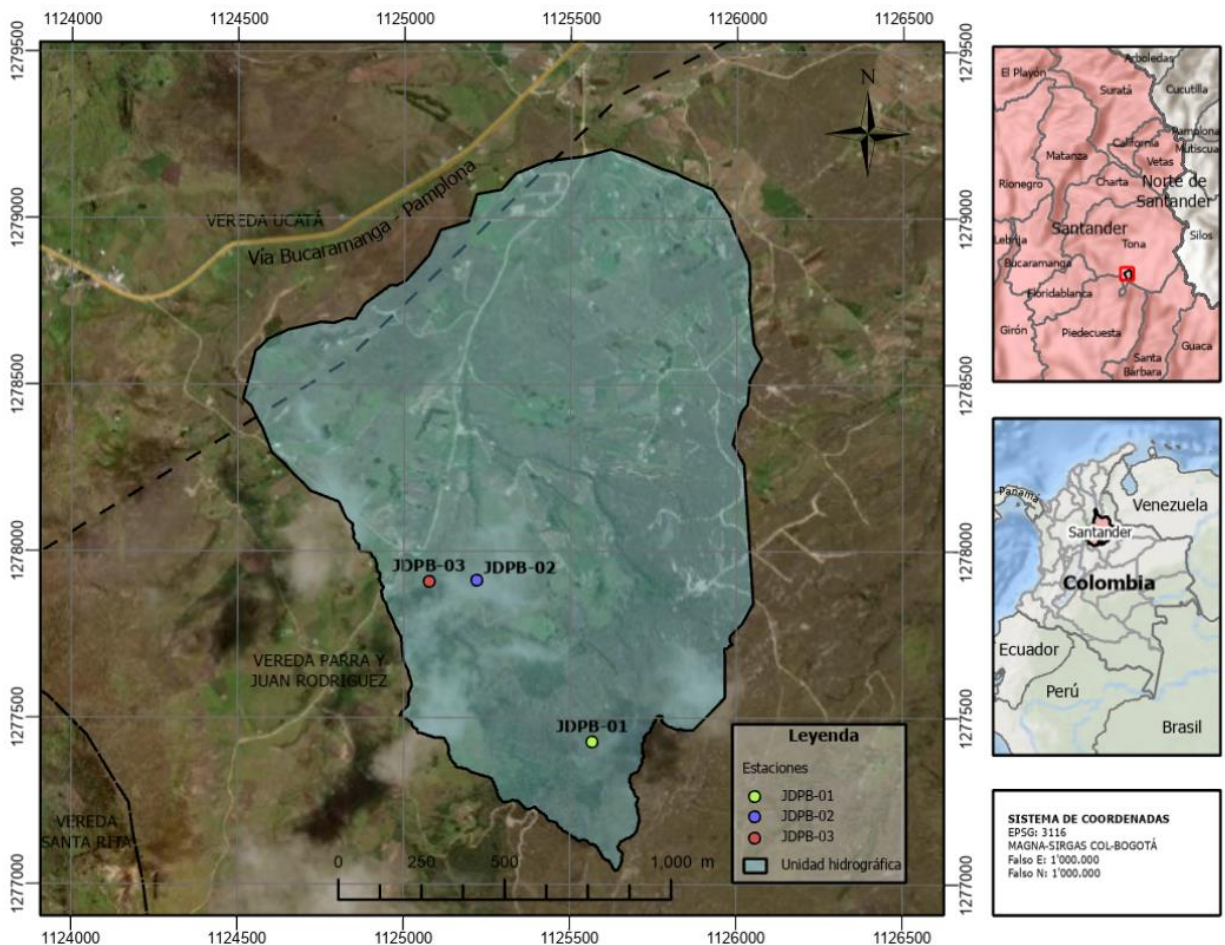
METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

2. Localización del área de estudio

La zona de estudio (Figura 1) abarca una unidad hidrográfica que se encuentra en el municipio de Tona, Santander, al margen derecho de la vía Bucaramanga – Pamplona km 52, a 3 km sobre la vía del conocido peaje El Picacho; en el desvío al margen derecho luego de toparse a la Cafetería Don Hugo. Esta unidad hidrográfica se encuentra dentro de la Vereda Parra y Juan Rodríguez y hace parte del complejo de páramo Jurisdicciones Santurbán-Berlín.

Figura 1

Mapa de localización de la zona de estudio



3. Actividades

En el marco de la presente pasantía de investigación se llevaron a cabo las siguientes actividades:

3.1 Revisión bibliográfica

Se estudió la información disponible en tres aspectos indispensables para este trabajo: la geología, los datos hidroclimáticos en el páramo y la literatura científica de suelos de páramos. Los dos últimos aspectos principalmente en el marco de los trabajos realizados por el Grupo de Investigación GPH.

En el aspecto geológico, con interés en la unidad definida por Ward & Goldsmith (1970) inicialmente como Batolito de Santa Bárbara, se revisó principalmente el estudio del Monzogranito de Santa Bárbara (nuevo nombre) del catálogo de unidades litoestratigráficas en Rodríguez et al. (2020) y la cartografía geológica oficial de la zona de estudio presentada por Ward et al. (1973) y posteriormente por INGEOMINAS-UIS (2007). El marco estructural lo proporciona el trabajo de Bejarano y Navas (2018) sobre los patrones de fracturamiento en el área y la evolución geológica general del Macizo de Santander descrita en diversos trabajos regionales como el de Royero y Clavijo (2001), el de Mora et al. (2006), entre otros.

A nivel hidroclimático, se cuenta con el trabajo publicado sobre los Páramos Andinos de Buytaert et al. (2006), el análisis de diferentes parámetros hidroclimáticos presentado por Gómez Ríos (2022) y aunado a ello con los datos de estaciones meteorológicas recopilados por el GPH. En cuanto al área de hidrogeología se presenta la tesis de maestría de Cetina (2019) y la caracterización de las propiedades hidrofísicas del área de estudio en Patiño (2021a).

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

El trabajo de Celis (2022) sobre las coberturas y usos del suelo en zonas cercanas y el artículo compilatorio realizado por Patiño et al. (2021b) sobre los suelos de los Andes del Norte son punto de partida para analizar las particularidades de los suelos del presente trabajo.

3.2 Antecedentes de los suelos de páramo

Generalmente los suelos de páramo se suelen presentar como húmedos, de carácter ácido, ricos en humus, desaturados, enmohecidos y de color pardo oscuro (Guhl, 1982, como se citó en Patiño, 2001a). En el artículo de Patiño et al. (2021b) se caracterizan de manera más específica los páramos andinos, se compilan los resultados de la revisión bibliográfica de estudios sobre suelos de páramo a lo largo de los Andes del Norte, donde se analizan las propiedades hidrofísicas de este tipo de suelos, principalmente en Colombia y Ecuador. Los suelos de páramo se caracterizan por tener un alto contenido de materia orgánica (MO) debido a las bajas temperaturas y altos contenidos de agua, que actúan como inhibidores de la degradación; las porosidades, aunque muy variantes, tienden a ser altas (75%), debido a su naturaleza granular y al alto contenido de MO y, además, presentan densidades aparentes bajas con valores promedio que van desde 0.15 a 0.9 g/cm³ (Patiño et al., 2021b).

Otras propiedades hidrológicas importantes que diferencian los suelos de páramo son la capacidad de retención de agua que tiende a ser alta a diferentes grados de succión del suelo, con valores de 60 a 70 % de contenido agua (Patiño et al., 2021b). Por otra parte, la infiltración básica, presenta valores altos y variantes con la profundidad, encontrándose reportes de 5.3 mm/h a los primeros 3 cm y 0.52 mm/h a los 15 cm (Patiño et al., 2021b).

Los suelos de páramo son muy sensibles a la intervención antrópica que produce cambios notables en las propiedades hidrofísicas. Se ha determinado que el desarrollo de actividades

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

agropecuarias contribuye a principalmente aumentar las tasas de erosión, disminuir la porosidad e incrementar la tasa de degradación de la MO (Celis, 2022).

3.3 Geología del área de estudio

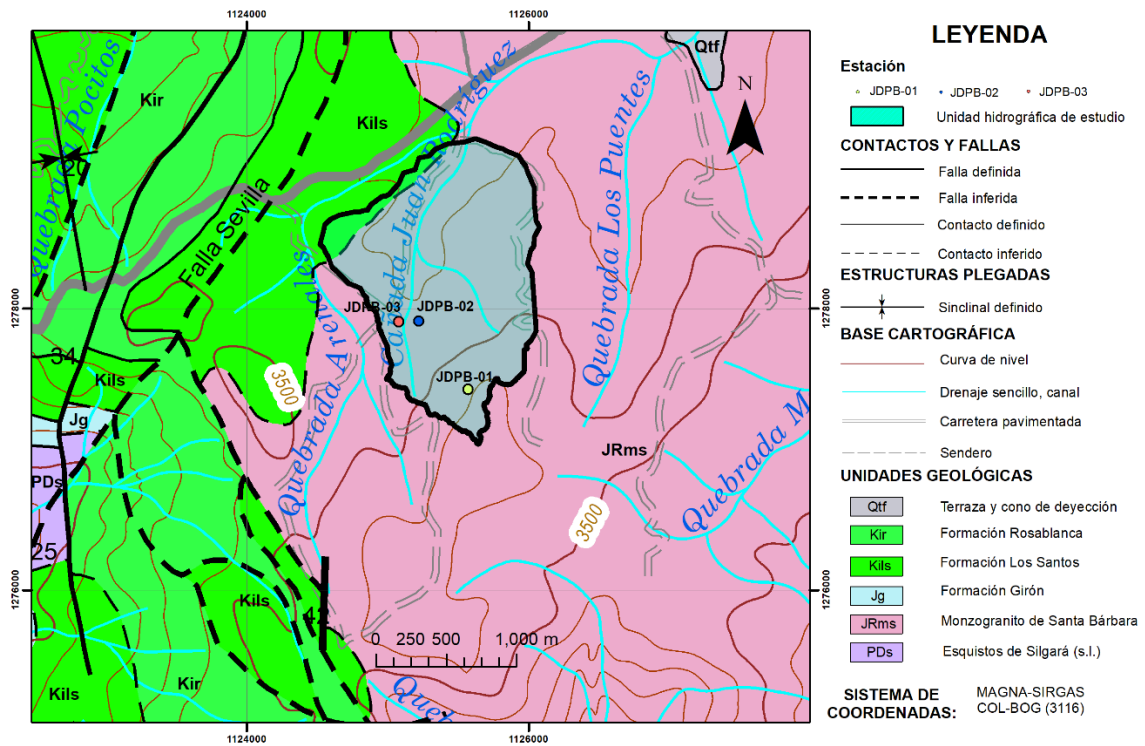
La zona se encuentra ubicada en el Macizo de Santander, localizado en la Cordillera Oriental (CO). La CO es interpretada como una cuenca extensional de tipo rift que sufrió varios eventos: extensión (en al menos dos momentos) en el Triásico-Jurásico y compresión de rumbo E-W en el Cenozoico que daría lugar a la inversión y actividad tectónica aún sostenida en el presente (Mora et al., 2006). Royero y Clavijo (2001) definen esta zona como un bloque levantado limitado al occidente por la Falla Bucaramanga-Santamarta y al suroriente por la Falla de Baraya. En síntesis, el estilo estructural de esta zona es de fallamiento en bloques menores separados por fallas inversas de rumbo principalmente SW-NE. En la unidad hidrográfica de estudio el tensor de esfuerzo local más cercano presenta un esfuerzo principal de compresión de 235/17, donde los principales patrones de fracturamiento se explican por el control estructural que genera el fallamiento inverso de alto ángulo de la Falla Santana que presenta un rumbo NNW-SSE (Bejarano & Navas, 2018).

Localmente en la unidad hidrográfica de estudio la principal roca de interés, material parental de los suelos, corresponde a la unidad cartografiada en Ward et al. (1973) como Cuarzomonzonita de Santa Bárbara posteriormente nombrada como Monzogranito de Santa Bárbara (Figura 2) por Rodríguez et al. (2020).

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 2

Mapa geológico de la zona de estudio y las estaciones de campo



Nota. Adaptado de la cartografía geológica oficial de Ward et al. (1977).

El Monzogranito de Santa Bárbara aflora en algunos sectores de los corregimientos de Berlín y Baraya, y en los municipios de Los Curos y Santa Bárbara, del departamento de Santander siendo uno de los principales cuerpos que intruye el Basamento Precámbrico y Paleozoico del Macizo de Santander (Rodríguez et al., 2020). La unidad presenta edades de ~200 Ma obtenida por el método U-Pb en circones (Rodríguez et al., 2020). Composicionalmente varía de sienogranitos a granodioritas, pero principalmente monzogranitos biotíticos compuestos de feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo, con presencia de biotitas y hornblenda, como accesorios se presentan opacos, circones, apatitos, titanita y en algunas rocas presencia de granate y allanita (Rodríguez et al., 2020). La apariencia general de la roca es entonces caracterizada por coloraciones blanco moteado de rosado a gris con texturas equigranulares a inequigranulares

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

(Rodríguez et al., 2020). Debido a las condiciones climáticas de la zona y a la mineralogía del Monzogranito de Santa Bárbara, especialmente las variaciones más feldespáticas, se produce a nivel hidrogeológico una roca con buenas porosidades que se comporta como un acuífero libre (Cetina, 2019).

3.4 Análisis de parámetros hidroclimáticos de la zona de estudio

El Páramo de Berlín hace parte de los denominados Páramos Andinos, y constan de ecosistemas de humedales alpinos neotropicales que cubren la región más alta de los Andes del Norte entre los 3500 m y los 5000 m, intervalo marcado por el límite superior del bosque y las nieves perpetuas, respectivamente (Buytaert et al., 2006).

El clima en las zonas de páramo se caracteriza por ser generalmente frío, con intensos vientos y heladas y presiones atmosféricas relativamente bajas; con fluctuaciones drásticas de la temperatura entre el día y la noche. Lo anterior, junto con la niebla o llovizna que aporta agua a los niveles más superficiales del perfil de suelo, acompleja las estimaciones de las variables hidrológicas (Córdova et al., 2013; Gómez Ríos, 2022). Investigaciones como las de Celis (2022) sobre los usos del suelo y de hidrogeología de Cetina (2019) abordan algunas de estas variables y metodologías de estudio en estas zonas.

Para el presente estudio se analizan los parámetros de precipitación y temperatura, los cuales son los principales factores hidroclimáticos que afectan los procesos de meteorización de las rocas o depósitos.

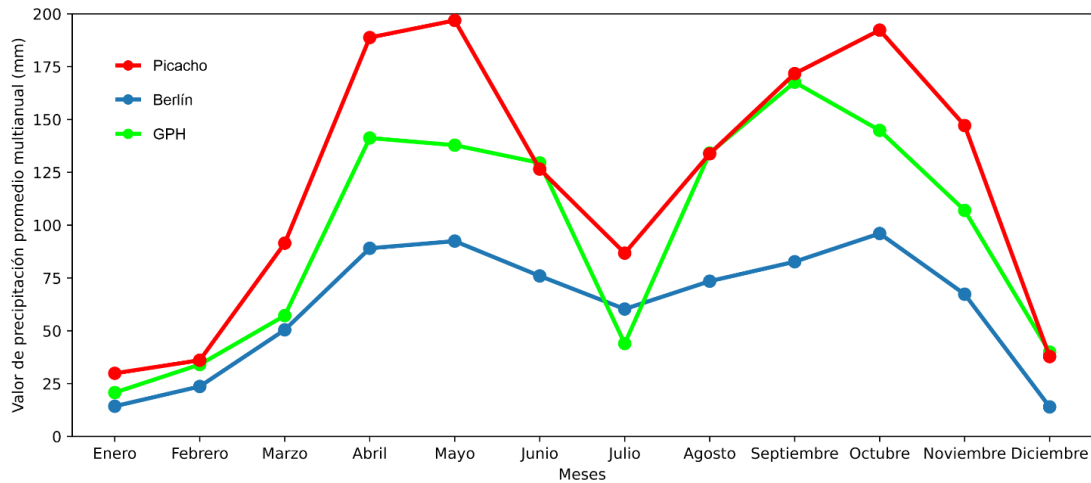
Para el análisis de las precipitaciones se tomaron los datos del IDEAM de las estaciones El Pichacho y Berlín durante los años 2004-2023 y los datos de la estación meteorológica instalada y operada por el Grupo GPH de la UIS dentro de la unidad hidrográfica, la cual cuenta con datos

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

desde el año 2019. En la Figura 3 se presentan las curvas de precipitación mensual de las Estaciones Picacho, Berlín y GPH.

Figura 3

Curvas de precipitación mensual de las Estaciones Picacho, Berlín y GPH



Nota. Los datos de la Estación Picacho y la Estación Berlín son tomados del IDEAM en un periodo de 20 años (2004-2023). Los datos de la Estación GPH son cortesía del grupo y abarcan el periodo del 2019 al 2023.

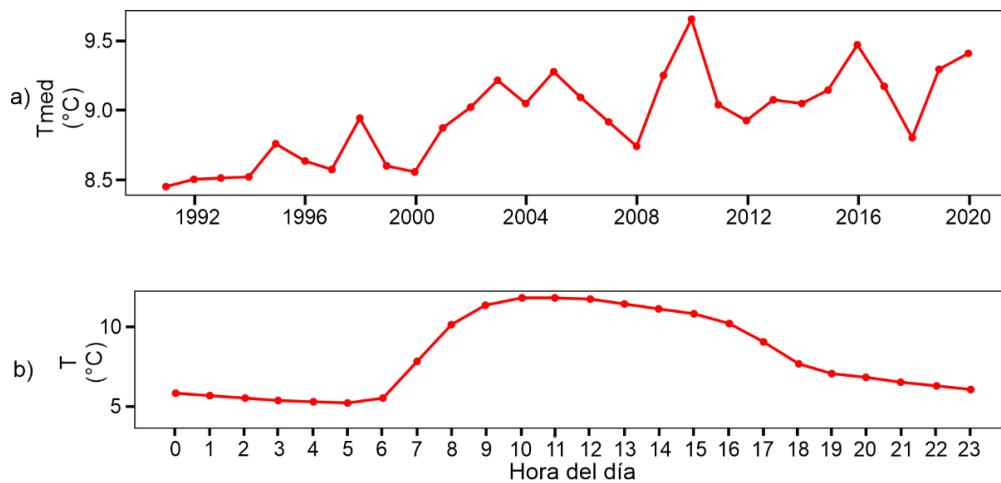
La Estación Picacho presenta un promedio de precipitaciones multianual de 1440 mm mientras que La Estación Berlín de 740 mm y la estación GPH un promedio de 1200 mm, siendo este último valor el más representativo de la unidad hidrológica. La considerable diferencia entre los datos promedio de las estaciones Picacho y Berlín se debe a que estos ecosistemas presentan altas variaciones espacio-temporales en los regímenes de precipitación (Buytaert, 2002; Ochoa-Tocachi, 2016, como se cita en Patiño et al., 2021b). Basado en los anteriores datos y teniendo en consideración los rangos de precipitaciones para los páramos en Buytaert (2006) se clasifica esta zona como un páramo semihúmedo.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

En cuanto a las condiciones de temperatura de la zona, la Figura 4a muestra el comportamiento de la temperatura anual desde el año 1992 hasta el 2020. La Figura 4b muestra las oscilaciones horarias promedio de la temperatura, donde se aprecia que la media se encuentra alrededor de 9 °C. Las variaciones a nivel diurno-nocturno de la temperatura en estos ecosistemas son considerables, pasando de unos 5°C en horas de la madrugada a unos 12 °C al medio día.

Figura 4

Gráficos de a) Temperatura media anual histórica de la zona de estudio b) Oscilaciones horarias promedios de la temperatura



Nota. Tomado y adaptado de Gómez Ríos (2022). T_{med}: temperatura media.

3.5 Trabajo de campo

Para la presente pasantía de investigación se realizaron dos salidas de campo al área de estudio. La primera salida tuvo como propósito el reconocimiento y selección de los afloramientos de roca, suelo y depósito cuaternario representativos. En la segunda salida campo se efectuaron las descripciones de los afloramientos seleccionados y se recolectaron las muestras de rocas y suelos para su posterior caracterización mineralógica en el laboratorio. En total se tomaron siete (7) muestras para secciones delgadas y seis (6) para análisis de difracción de rayos X (DRX) que abarcaron desde el material parental inalterado, el suelo generado y el depósito cuaternario. Las

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

muestras de suelo se tomaron mediante la extracción de fragmentos de monolitos de perfiles ya expuestos. Las muestras de DRX fueron trituradas y molidas con el mortero eléctrico propiedad de la Escuela de Geología y tamizadas con malla 200, donde se recolectaron 5 g para cuatro (4) muestras para el análisis cuantitativo y 60 g para dos (2) muestras que fueron a análisis de fracción arcillosa. Las muestras de DRX fueron enviadas al Laboratorio de Rayos X de la UIS sede Guatiguará y las secciones delgadas fueron realizadas cinco (5) de ellas en el Laboratorio de preparación de muestras de la Escuela de Geología y otras dos (2) en el Laboratorio de preparación de muestras sede Guatiguará.

Para la descripción de los perfiles de meteorización identificados se siguieron las pautas del Servicio Geológico Colombiano (SGC) de Rodríguez Castiblanco et al. (2017), tomando la clasificación de suelos según Brown (1981), Dewandel et al. (2006) y Borrelli et al. (2014) adaptada por Colegial Gutiérrez (2017) (Tabla 1). Así mismo, se realizó la toma de datos estructurales donde fue pertinente, principalmente de planos de fracturas con el fin de obtener información sobre la meteorización mecánica de la roca.

Tabla 1

Clasificación de suelos adaptada por Colegial Gutiérrez (2017)

Brown (1981)	Dewandel et al. (2006)	Borrelli et al. (2014)	Descripción de afloramiento
VI Suelo residual	Laterita o Corteza De Hierro	VI Suelo Residual y Coluvión	Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material. El macizo rocoso se compone principalmente de suelo residual, coluvial. El material tiene principalmente las siguientes características: completamente decolorados, piezas de gran tamaño pueden ser fácilmente disgregadas con las manos y se desmorona por la presión de los dedos en los granos constituyentes. En algunas ocasiones puede estar ausente, debido a la erosión o re-hidratación de hemetita. Se disgrega con el tacto, deleznable con el martillo y puede desconcharse con una navaja.
V Completamente Meteorizado	Saprolito o Alterita, Regolito	V Completamente Meteorizada	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto, completamente descolorido. No conserva la estructura original de la roca o se encuentra en forma de relicto. La masa de roca está completamente meteorizada (saprolito) (más de 70% del afloramiento). En este intervalo se define la Alloterite: la cual es un horizonte arcilloso, donde se presenta una reducción de volumen relacionado con procesos de meteorización mineralógica.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

IV Altamente Meteorizado		IV Altamente Meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo, completamente descolorido. La masa de roca está altamente meteorizada (más de 70% del afloramiento); volúmenes de macizos rocosos limitados por discontinuidades pueden estar constituidos por roca moderadamente o altamente meteorizada. Los volúmenes constituidos por suelos residuales, se presentan rara vez en el afloramiento, las fracciones arena y limos son predominantes. En este intervalo se define la Isalterita en la cual los procesos de meteorización sólo inducen un ligero cambio del volumen y conservan la estructura de la roca original.
III Moderadamente Meteorizado	Capa Laminada	III Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados. La masa de roca esta moderadamente meteorizada (más de 70% del afloramiento). Es la base de la Isalterite, presenta laminación horizontal de los minerales más grandes (por ejemplo, pórfidos de feldespato), pero sigue conservando en gran medida la estructura original de la roca. Los colores penetrantemente son más tenues en comparación con la roca fresca, pero localmente el color de la roca fresca está presente. Para rocas ígneas moderadamente meteorizadas, se observan fracturas concoideas o concéntricas (Core Stones) formando estructuras de “Cascarones”.
II Ligeramente Meteorizado	Capa Fisurada	II Ligeramente Meteorizada	La masa de roca está ligeramente meteorizada (más de 70% del afloramiento). Presenta el mismo color de la roca fresca con decoloración sólo cerca de las discontinuidades; textura y microestructura de la roca fresca originales se conservan perfectamente. Se caracteriza por presentar fisuras densas horizontales en los primeros metros y a una mayor profundidad fisuras sub-horizontales y sub-verticales.
I Roca Fresca	Basamento Fresco	I Roca Fresca	Roca sin cambio desde el estado original o solo ligeramente manchado a lo largo de las discontinuidades. La masa de roca es fresca (más de 70% del afloramiento). Puede ser considerado como impermeable y de muy bajo coeficiente de almacenamiento, en una escala local.

A continuación, se registra la información obtenida en cada una de las estaciones de campo.

La ubicación de estas estaciones se señala en las Figuras Figura 1 y Figura 2.

3.5.1 Estación JDPB-01

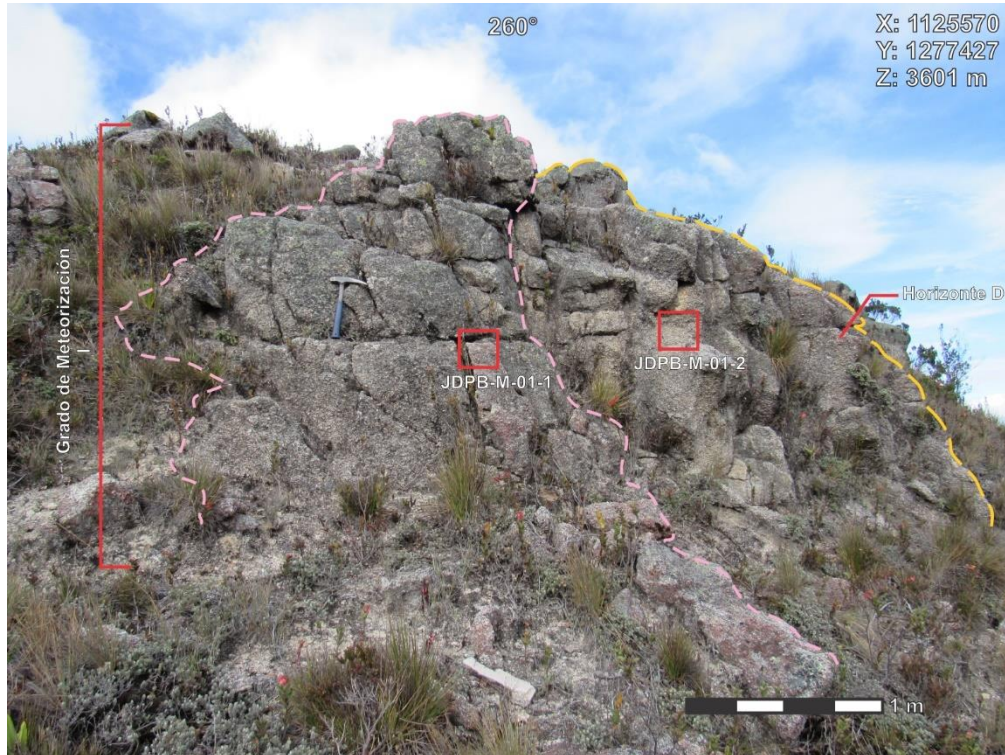
Ubicada cerca de la Vía Bucaramanga-Pamplona, a 40 minutos de la Parada El Picacho en el kilómetro 52, Vereda Parra con Rodríguez en la Jurisdicción Santurbán – Berlín, con coordenadas planas 1°125.570 mE y 1°277.427 mN (datum MAGNA-SIRGAS origen Bogotá), a una elevación de 3601 m.s.n.m. Se observa un afloramiento de 20 m de ancho y 8 m de largo aproximadamente que exhibe el material parental fresco (con algunas zonas ligera a moderadamente alteradas) y un importante grado de diaclasamiento con bloques ligeramente redondeados. Se clasifica con el grado de meteorización II (roca ligeramente meteorizada). Su coloración según Munsell es 10YR 7/4, de textura predominante fanerítica, pero con un cambio textural importante de la muestra JDPB-M-01-1 a la muestra JDPB-M-02-2, disminuyendo los

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

tamaños de grano de muy grueso a muy fino, dicho cambio también se refleja en un cambio de coloración de rojizo a amarillento que se puede observar en la Figura 5.

Figura 5

Fotografía del afloramiento de la estación JDPB-01: Monzogranito de Santa Bárbara (roca parental)



Nota. Contorno rosado indica el material del cual es representativa la muestra JDPB-M-01-1 y el contorno amarillo lo que representa la muestra JDPB-M-02-2.

Las muestras de roca tomadas se describieron macroscópicamente durante la salida de campo, de la siguiente manera:

Muestra de mano JDPB-M-01-1

Roca ígnea intrusiva fanerítica de grano variable de tamaño de grano grueso a muy grueso, cristales euhedrales a subhedrales. Mineralógicamente está compuesta por feldespato potásico de color marrón rojizo, plagioclasas muy poco meteorizadas, cristales de cuarzo de grano medio a

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

grueso, biotita, anfíboles y óxidos de Fe. Estimación mineralógica: 20% cuarzo, 45% feldespato alcalino y 35% plagioclasas (Figura 6).

Figura 6

Fotografía de la muestra de mano JDPB-M-01-1



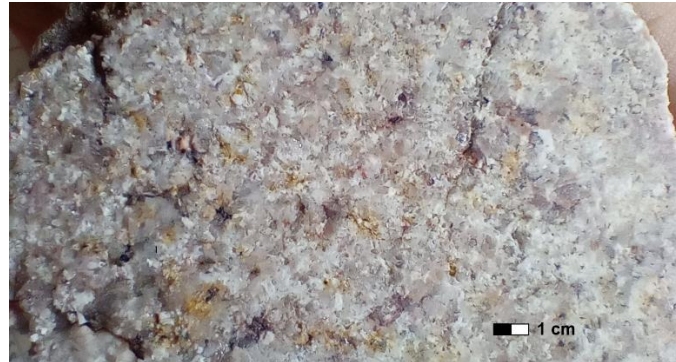
Muestra de mano JDPB-M-01-2

Roca ígnea intrusiva fanerítica de grano fino a medio y cristales euhedrales predominantemente. Composicionalmente plagioclasas equidimensionales escasamente alteradas, cuarzo, plagioclasas, feldespato potásico, mica moscovita, anfíboles, biotita. Se observa un cambio textural-composicional local respecto a la muestra JDPB-M-01-1. Estimación mineralógica: 35% cuarzo, 20% feldespato alcalino y 45% plagioclasas (Figura 7).

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 7

Fotografía de la muestra de mano JDPB-M-01-2



Para el análisis de los factores estructurales locales se realizó el muestreo de los patrones de fracturas en roca parental de la estación JDPB-01 (Tabla 2). A partir de los datos tomados se observa que el patrón de fracturas cerradas presenta una tendencia de rumbo NE-SW, las fracturas abiertas un patrón que sugiere dos familias, con rumbos NE-SW y WNW-ESE, y por último, fracturas de cara libre (de menor muestreo) un patrón N-S (Figura 8).

Tabla 2

Datos estructurales tomados en la estación JDPB-01

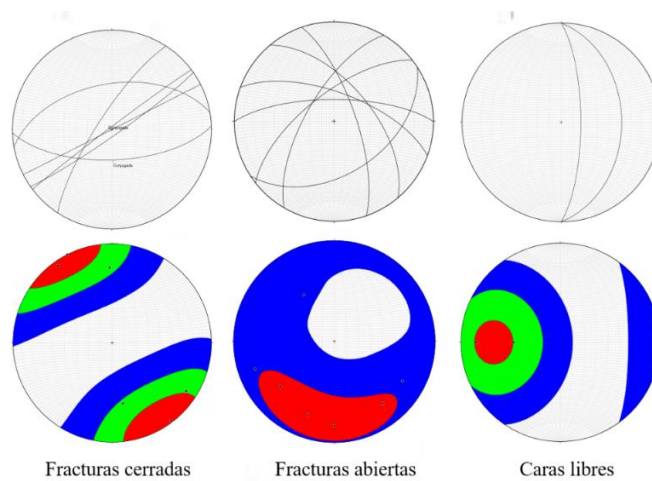
Estación	Tipo de estructura	Dato estructural (azimuth de rumbo)	Observación
JDPB-01	Fractura cerrada	260/52	
		055/85	
		063/90	
		213/78	
		088/65	Conjugada
		233/88	Conjugada
	Fractura abierta	341/72	abierta 1 cm apertura
		320/59	1 cm apertura, rellena
		290/66	1-3 cm apertura
		270/72	5 cm apertura, rellena
		232/67	1-7 cm apertura, rellena

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

	057/46	1 cm apertura
	210/67	6-8 cm apertura, rellena
Cara libre	000/74	
	000/39	

Figura 8

Estereogramas de las diaclasas registradas en campo en la parte superior y la concentración de sus respectivos polos.



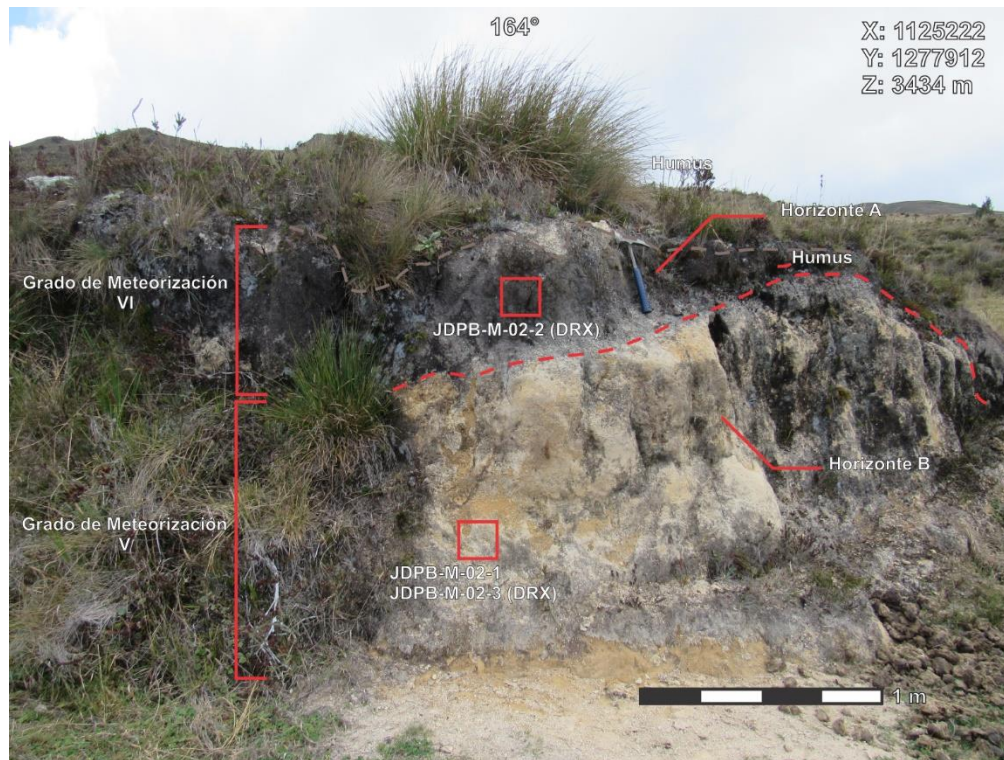
3.5.2 Estación JDPB-02

Ubicada cerca de la Vía Bucaramanga-Pamplona, a 20 minutos de la Parada El Picacho en el kilómetro 52, Vereda Parra con Rodríguez en la Jurisdicción Santurbán – Berlín, con coordenadas planas 1'125.222 mE y 1'277.912 mN (datum MAGNA-SIRGAS origen Bogotá), a una elevación de 3434 m.s.n.m. Este perfil presenta roca ígnea meteorizada, en sus horizontes más degradados, hasta llegar a la capa humus. Tiene dimensiones de 4 m de ancho por 1.7 m de alto (Figura 9).

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 9

Fotografía de la estación JDPB-02. Suelo desarrollado



Nota. Se observa el suelo residual (VI) y la roca completamente meteorizada (V). Coloración oscura característica de la alta concentración del humus.

Se identifican dos grados de meteorización (ver criterios de clasificación en la Tabla 1), los cuáles se muestran en la Figura 9 y se describen de base a techo a continuación:

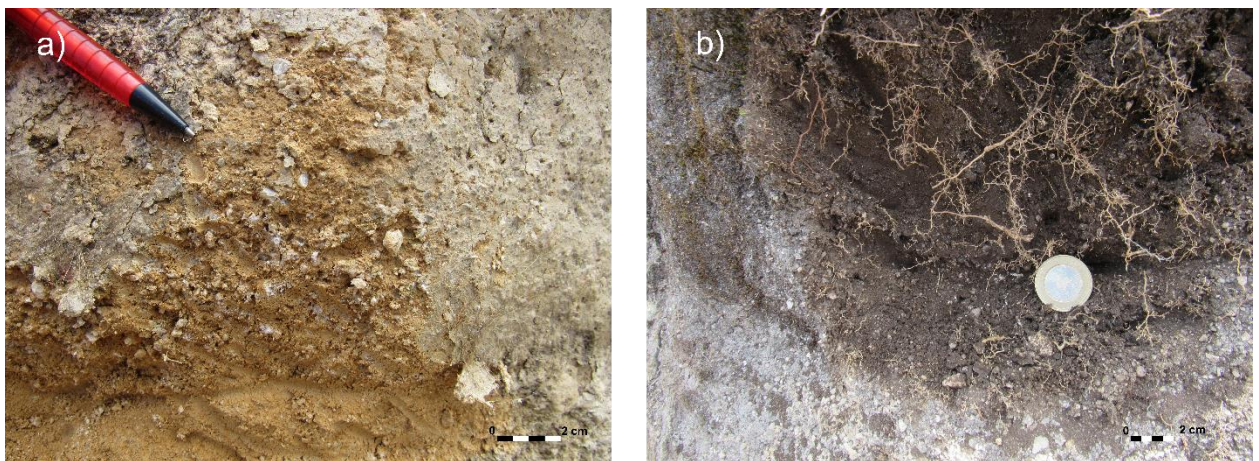
Grado V de meteorización: roca completamente meteorizada (Figura 10a). Esta capa del perfil presenta un espesor de 1.1 m y coloración 10 YR 6/6 *Dark Yellowish Orange*. Los tamaños de grano van desde arcilla hasta, en el caso de los cuarzos relictos, arena muy gruesa. Los granos se observan angulares y mal calibrados, principalmente de cuarzos y feldespatos, pero también con presencia de micas. No es apreciable la incidencia orgánica, solo se aprecian algunas raíces. Se haya en contacto gradacional irregular con la capa que le suprayace (descrita a continuación).

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Grado VI de meteorización: suelo residual (Figura 10b). Este presenta un espesor de 45 cm. La coloración es 5YR 4/1 *Brownish Gray*. Los tamaños de grano varían desde el tamaño arcilla a la arena muy fina, predominantemente, aunque también se presentan cuarzos relictos de tamaño arena muy gruesa a gránulos. Esta capa se encuentra completamente dominada por la presencia de MO identificable por la coloración, el tacto carbonoso y la alta cantidad de raíces, es decir, corresponde a un nivel de humus que es fácilmente disgregable.

Figura 10

Fotografías de detalle de la Estación JDPB-02. a) roca completamente meteorizada b) suelo residual



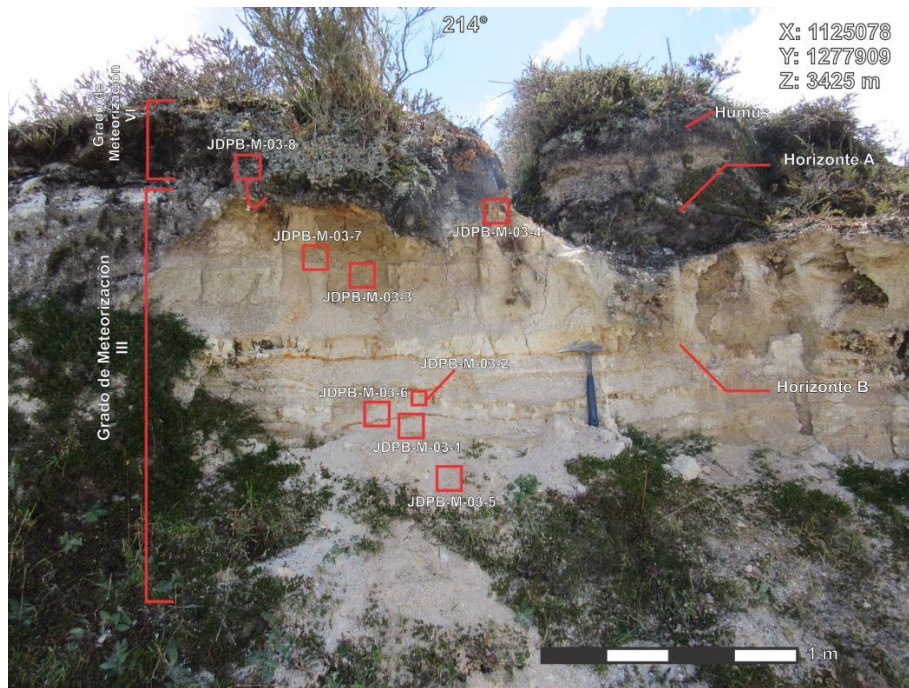
3.5.3 Estación JDPB-03

Ubicada cerca de la Vía Bucaramanga-Pamplona, a 20 minutos de la Parada El Picacho en el kilómetro 52, Vereda Parra con Rodríguez en la Jurisdicción Santurbán – Berlín, con coordenadas planas 1'125.078 mE y 1'277.909 mN (datum MAGNA-SIRGAS origen Bogotá), a una elevación de 3425 m.s.n.m. Consta de un depósito cuaternario de 4 m de ancho y 2 m de alto que presenta dos grados identificables de meteorización (Figura 11):

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 11

Fotografía de la estación JDPB-03. Depósito cuaternario.



Nota. Se observa el horizonte meteorizado (III) y el suelo residual generado (VI). Este perfil presenta varios niveles los cuales son esquematizados en la columna estratigráfica de la Figura 12. A continuación, se describen los niveles meteorizados en el depósito cuaternario de base a techo:

Grado III de meteorización: moderadamente meteorizado. Esta capa de 2 m de espesor presenta niveles compuestos de granos tamaños arenas gruesas y guijarros, intercalados con niveles arcillosos, muy cohesivos. Las coloración para los niveles arcillosos es 10YR 8/2 *Very Pale Orange* y para los niveles oxidados, muy marcados, es 10YR 6/8 *Brownish Yellow*, estos evidencian ascensos y fluctuaciones del nivel freático en la zona. Los niveles de granos gruesos presentan coloración 5YR 8/1 *Pinkish Gray*.

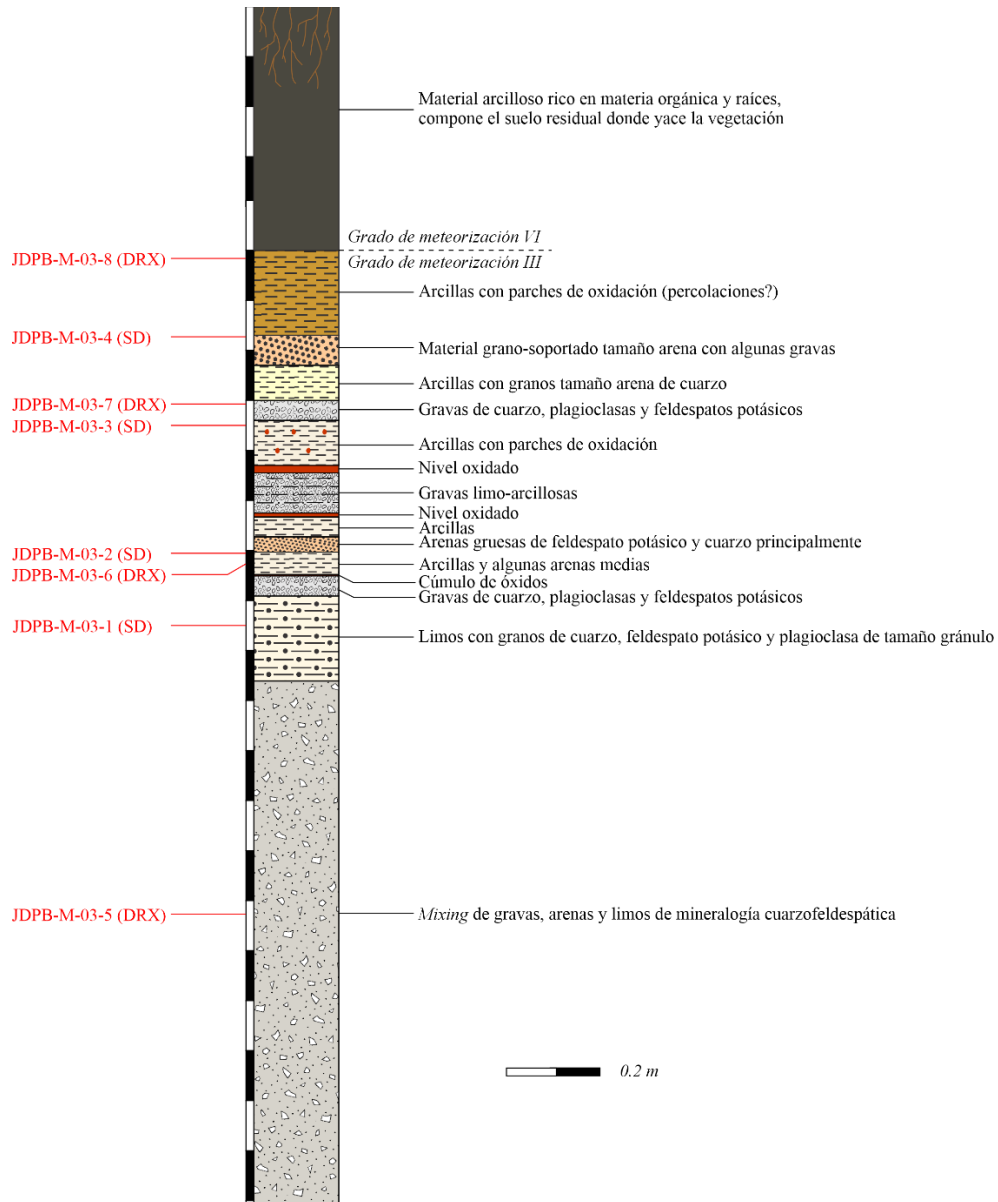
La mineralogía de los niveles gruesos (arenas gruesa y guijarros) consta de relictos de cuarzos angulosos de tamaño arena gruesa con presencia de plagioclasas y feldespato potásico que lograron conservarse en las facies más gruesas del depósito. Se observa que los niveles gruesos

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

cambian abruptamente de tamaño de grano al encontrarse con un nivel oxidado que da paso a los niveles finos de material arcilloso que son más compactos, y presentan esporádicos cuarzos relictos. El contacto entre los dos niveles es neto irregular (ver Figura 13a).

Figura 12

Columna estratigráfica del depósito cuaternario. Elaboración propia



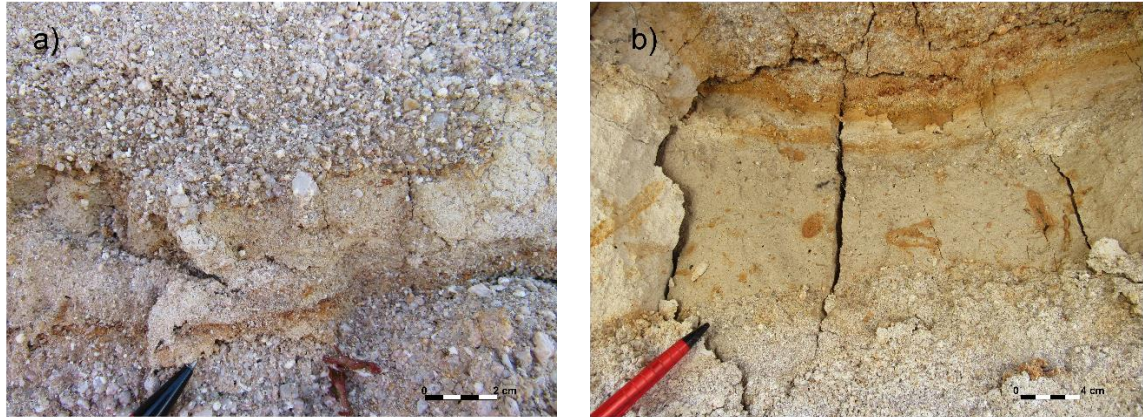
También, es posible observar hacia las partes superiores del perfil, una serie de láminas oxidadas de color anaranjado y concentraciones ovaladas de oxidación distribuidas irregularmente

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

debajo de estas láminas, que podrían suponer zonas de percolación; se presenta además en un contacto gradacional entre los niveles más gruesos que las contienen (Figura 13b).

Figura 13

Fotografías cercanas a las capas de la Estación JDPB-03: a) arcillas con concentraciones de óxidos b) intercalación de niveles gruesos y -finos.



Grado VI de meteorización: suelo residual. Capa de 0,5 m de espesor que consta del material rico en humus y vegetación, de color 5Y 2/1 *Olive Black* con tamaños de grano limos y arcillas con cuarzos de grano muy grueso abundantes.

Finalmente, cabe mencionar que el depósito cuaternario estudiado se clasifica como un depósito glaciolacustrino debido al ambiente glacial del área (definido en el trabajo de SGC-UIS, 2014), y a las características granulométricas de los niveles observados que fueron formados por deposición de sedimentos finos (limos y arcillas), y arenas y gravas traídas por aguas descongeladas.

3.6 Análisis petrográfico

Se elaboraron siete (7) secciones delgadas para su descripción y análisis, usando microscopía petrográfica de luz polarizada y, complementando, resultados de DRX. A continuación, se presentan las descripciones de cada sección delgada:

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Monzogranito (JDPB-M-01-1)

Esta sección se clasificó como monzogranito, su mineralogía se resume en la Tabla 3. Presenta color gris rojizo, brillo vítreo, estructura maciza, y textura fanerítica de tamaño grano fino. Se logra observar procesos de cloritización en ferromagnesianos y argilización en feldespatos. Microfotografías en la Figura 14.

Tabla 3

Mineralogía del monzogranito (JDPB-M-01-1)

Minerales principales	Ortoclasa, cuarzo, albita
Minerales menores	Biotita
Minerales accesorios	Opacos (pirita?)
Minerales secundarios	Clorita, sericita, caolinita y otros oxihidroxidos

Ortoclasa (33.99%): Mineral individual incoloro de bajo relieve, forma subhedral, hábito tabular y prismático, birrefringencia de primer orden, y tamaño de grano grueso. Como características diferenciales algunos cristales se presentan con clivaje en dos direcciones casi perpendiculares (no muy notorio por la baja birrefringencia) o en muchos casos exsoluciones de tipo pertita. Alteraciones leves a arcillas en la mayoría de los cristales (principalmente a caolinita, ver DRX).

Cuarzo (32.41%): Cristal incoloro de bajo relieve, forma subhedral a anhedral, hábito irregular con algunos cristales granulares, birrefringencia de primer orden y tamaños de grano medio. Algunos cristales levemente fracturados, con fracturas cerradas paralelas.

Plagioclasa (27.27%): Cristal incoloro de bajo relieve, forma subhedral, hábito tabular y prismático, birrefringencia de primer orden, y tamaños de grano medio a grueso. Algunos cristales presentan macla polisintética acompañada o no de alteración sericítica de intensidad variada (de incipiente a reemplazo total).

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

La sericita se encuentra como agregados unimodales finos, con color de birrefringencia amarillo del primer orden. En ocasiones siguen la dirección de alargamiento del cristal, o a manera de parches bimodales (fino-muy fino).

Biotita (5.93%): Cristal de color ocre claro, relieve bajo-moderado, forma subhedrale a euهدral, de tamaño medio a grueso, hábito tabular, y color de interferencia amarillo intenso (birrefringencia original enmascarada por la oxidación de Fe). Presenta epidotización en algunos de los cristales, parches irregularmente distribuidos de alteración clorítica, e inclusiones de minerales opacos.

La epidota presenta color amarillo-crema o similar color a las partes cloritizadas pero diferenciado por un relieve alto y colores de interferencia violetas del segundo orden a verdes del tercer orden.

La clorita se encuentra como parches translucidos, ocre más claros o verdosos siguiendo la línea de exfoliación de la biotita, con colores bajos de interferencia (inicios y mediados de primer orden con algunos anómalos azules berlines) propios de este tipo de alteración.

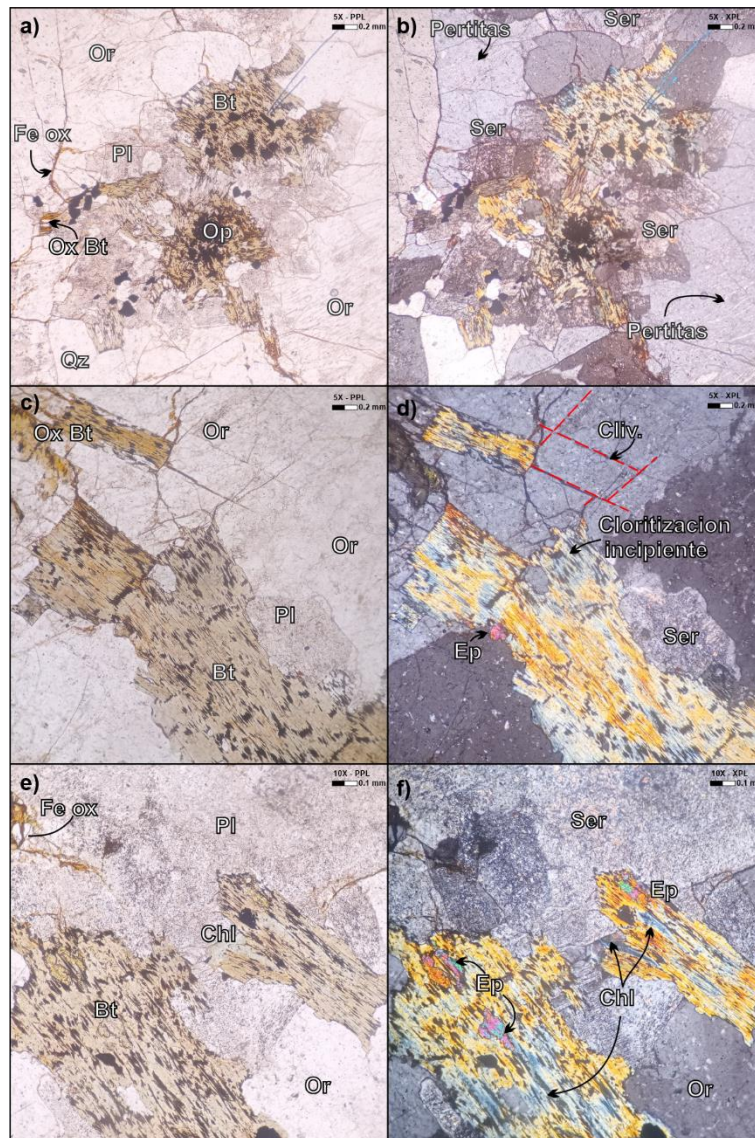
Minerales opacos (1%): agregados muy finos de formas subhedrales a euهدrales, hábito cúbico, algunos de ellos con macla de intercrecimiento?. Se concentran mayoritariamente en aglomerados dentro de las biotitas. También se presentan opacos alargados muy finos en dirección de la exfoliación de la biotita a manera de inclusiones.

Se presentan algunas vetillas de oxihidróxidos de Fe, muy finas, de color amarillo (probablemente por predominancia de goetita) que han llegado a afectar a los cristales de biotita, como se ha descrito anteriormente.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 14

Microfotografías del monzogranito (JDPB-M-01-1).



Nota. Las muestras corresponden al grado I de meteorización, material parental. Las microfotografías a, c y e están en nicols paralelos, las b, d y f en nicols cruzados. Or: ortoclasa; Qz: cuarzo; Pl: plagioclasa; Ox: óxido; Bt: biotita; Ser: sericita; Ep: epidota; Chl: clorita; Op: opacos; Fe: hierro.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Granodiorita (JDPB-M-01-2)

Esta sección se clasificó como granodiorita, su mineralogía se resume en la Tabla 4. Presenta color gris oscuro con brillo vítreo, estructura maciza, textura fanerítica, tamaño de grano grueso, distribución mineral uniforme y parches de oxidación abundantes. Moderada alteración es visible en la plagioclasa y la ortoclasa (Figura 15).

Tabla 4

Mineralogía de la granodiorita (JDPB-M-01-2).

Minerales principales	Cuarzo, albita, ortoclasa
Minerales accesorios	Biotita, opacos
Minerales secundarios	Sericita, caolinita, hematita y otros oxihidroxidos

Cuarzo (42%): Cristal incoloro, de bajo relieve, forma subhedral a anhedral, hábito irregular a granular, y tamaño de grano muy fino a muy grueso. Cristales poco fracturados y con birrefringencia baja.

Plagioclasa (36%): Cristal incoloro, bajo relieve, forma subhedral, hábito tabular, tamaños de grano muy fino a muy grueso y baja birrefringencia. Presenta macla simple y polisintética con grados de alteración sericítica evidente en todos sus cristales.

La sericita se observa como agregados micáceos muy finos, con color de interferencia amarillo del primer orden. La alteración a sericita se observa desde incipiente a reemplazo casi total, generalmente distribuyéndose en toda la superficie de la plagioclasa.

Ortoclasa (20%): Cristal incoloro, bajo relieve, forma subhedral, hábito tabular, tamaños de grano grueso a muy grueso y baja birrefringencia. Varios cristales presentan clivaje en dos direcciones ortogonales, alteración caolinítica que tiende a seguir una de las direcciones de exfoliación y exsoluciones de perfitas.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Biotita (1%): Cristal de color marrón muy claro a marrón verdoso oscuro, relieve bajo-medio, forma subhedral a anhedral, hábito tabular alargado, tamaño de grano medio, color de interferencia de amarillos-rojizos primer orden a mediados del segundo y presenta inclusiones de minerales opacos paralelos a la exfoliación. Algunos cristales pueden presentar un color amarillo miel debido a procesos de goetización.

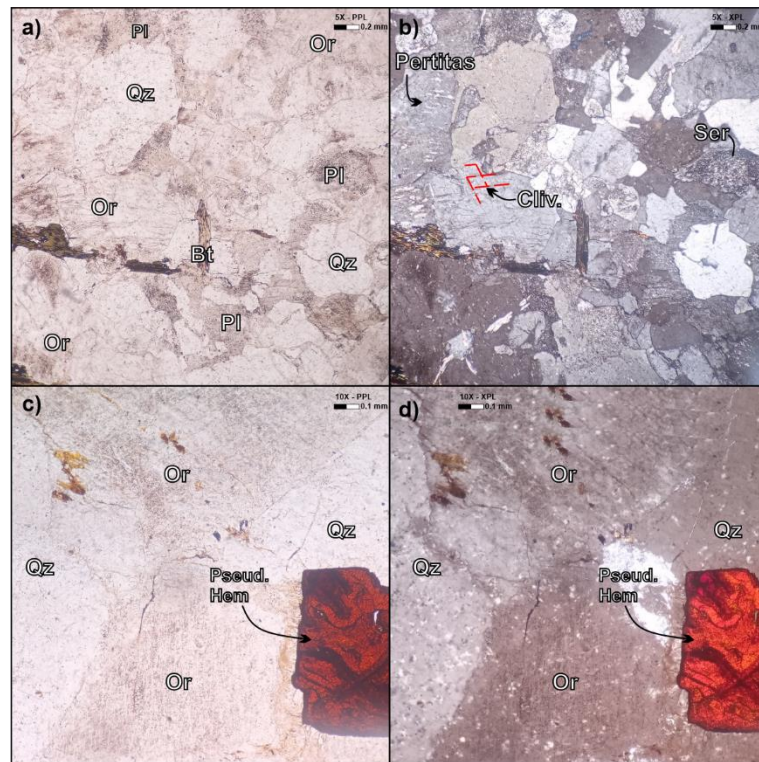
Minerales opacos (1%): cristales de tamaño fino de hábito granular, ubicados en los bordes de los contactos como agregados o dentro de cualquiera de los minerales principales como individuos, particularmente en la biotita como se mencionó.

Se presenta un cristal color rojo carmesí, forma euhedral, hábito tabular y tamaño de grano grueso, color de interferencia enmascarado por su fuerte coloración. Contiene estructuras internas vermiformes (pedogénicas?). Por lo anterior se definió como hematita, aunque podría haber mezcla de otros oxihidróxidos de Fe también.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 15

Microfotografías de la granodiorita (JDPB-M-01-2).



Nota. Las muestras corresponden al grado I de meteorización, *i.e.*, el material parental. Las microfotografías a y c están en nicols paralelos, las b y d en nicols cruzados. Or: ortoclasa; Qz: cuarzo; Pl: plagioclasa; Pseud. hem: hematita pseudomorfa; Bt: biotita; Ser: sericita; Cliv.: clivaje.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

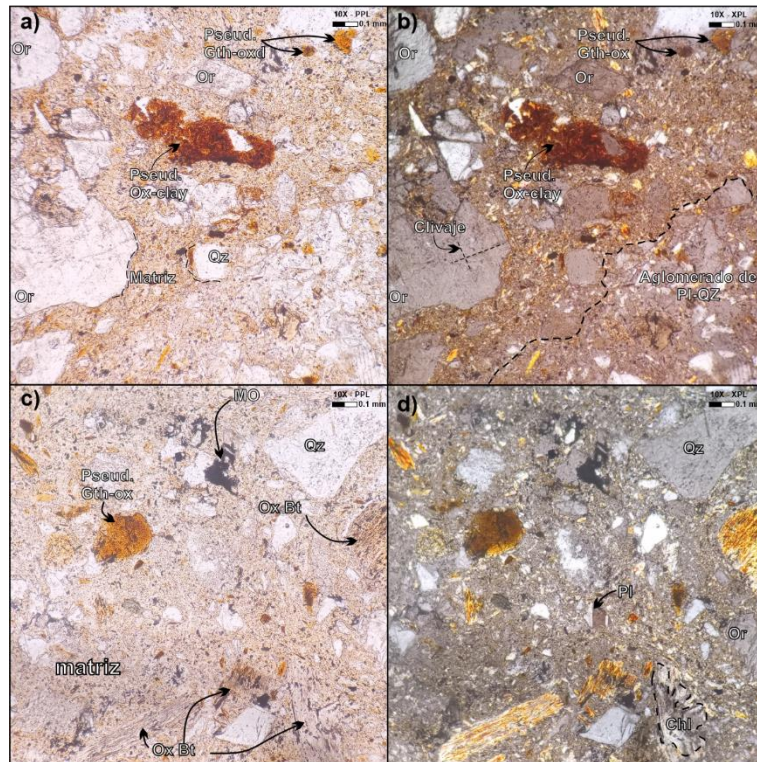
Roca completamente meteorizada (JDPB-M-02-1)

Esta muestra pertenece al grado V de meteorización, roca completamente meteorizada (Figura 16), clasificada como sienogranito (matriz-soportado), pobremente calibrado, armazón compuesto de arenas de tamaño de grano muy finas y medias dentro de una matriz (36%) limo-arcillosa gris amarillenta. La matriz está compuesta principalmente por material limoso de mineralogía análoga a la del armazón, sericita, arcillas, oxihidroxidos de Fe y MO. Los contactos entre granos tienden a ser flotantes, aunque se presentan frecuentemente de carácter puntual, de formas predominantemente subprismáticas y angulosas. Composicionalmente prima el cuarzo (23%), luego la ortoclasa (22%), la albita (4%), la biotita (3%), los oxihidróxidos (2%), los pseudomorfos arcillosos (1%), MO (1%) y finalmente la muscovita (1%). Por la coloración predominante de la matriz y las observaciones de la estación JDPB-02 se intuye que se trata de un horizonte oxidado.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 16

Microfotografías de la roca completamente meteorizada (JDPB-M-02-1).



Nota. La muestra corresponde al grado V de meteorización, *i.e.*, roca completamente meteorizada.

Las microfotografías a y c están en nicoles paralelos, las b y d en nicoles cruzados. Or: ortoclasa;

Qz: cuarzo; Pl: plagioclasa; Pseud: pseudomorfo; Bt: biotita; Ox: óxido; Gth: goetita; clay: arcillas;

Chl: clorita; MO: materia orgánica

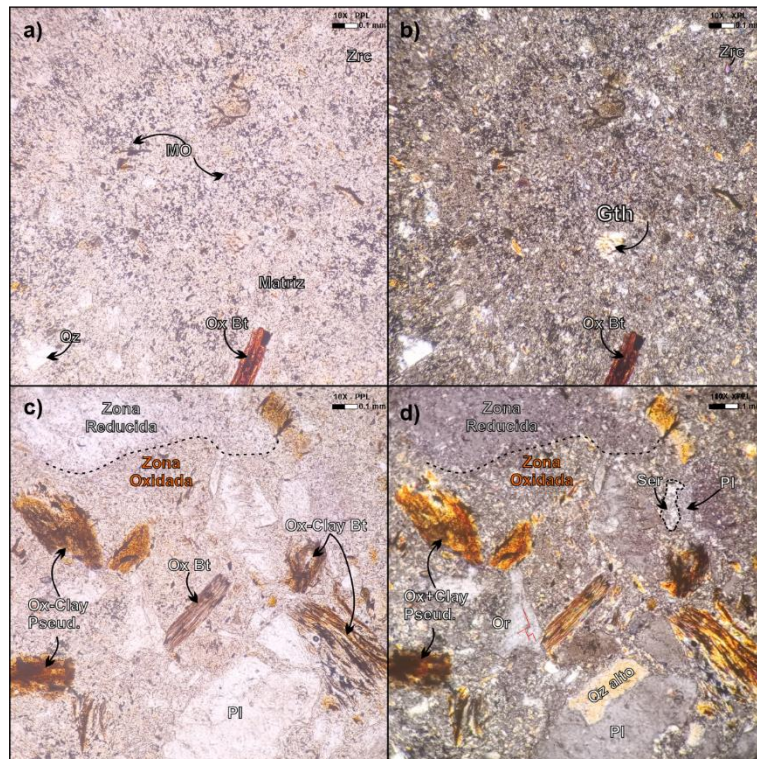
METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Depósito cuaternario (JDPB-M-03-1)

Esta muestra hace parte del grado III de meteorización del perfil, clasificada como *wacke* feldespática (Figura 17), con mayor dominancia de la matriz (59%) en la composición que la muestra anterior. Se evidencia una matriz limosa de coloración entre crema y grisácea (por sectores) característica de interacciones redox de la matriz, siendo la grisácea la que ha sufrido reducción y la parte crema la oxidada (Verecchia & Trombino, 2021), por otra parte, el tamaño de grano arena media predomina en el armazón; la muestra está moderadamente calibrada, la biotita y la plagioclasa tienden a estar en contactos netos o puntuales (por sus mayores tamaños de grano) pero en general el contacto es flotante, los granos son prismáticos y subangulosos. La composición mineralógica está dada por cuarzo (11%), biotita (7%), albita (6%), arcillas pseudomorfas (5%), ortoclasa (5%), óxidos de Fe (4%), moscovita (1%), opacos (1%) y MO (1%).

Figura 17

Microfotografías del depósito cuaternario (JDPB-M-03-1).



METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

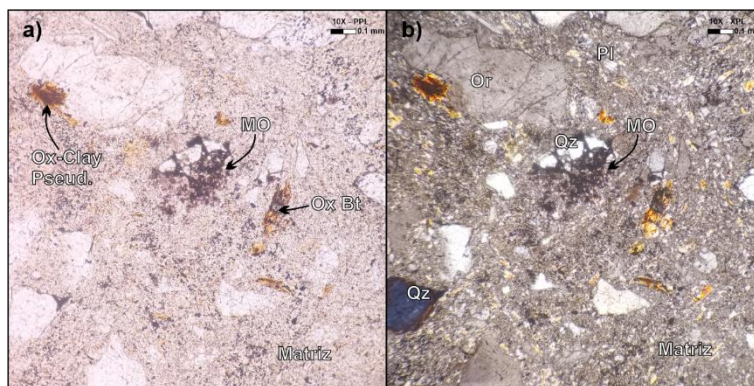
Nota. Grado V de meteorización: depósito completamente meteorizado. Las microfotografías a y c están en nicoles paralelos, las b y d en nicoles cruzados. Qz: cuarzo; Or: ortoclasa; Bt: biotita; Ox: óxido; Gth: goetita; Pl: plagioclasa; Ser: sericita; Clay: arcillas; Pseud.: pseudomorfo; Zrc: zircón; MO: materia orgánica.

Depósito cuaternario (JDPB-M-03-2)

Esta muestra hace parte del grado III de meteorización del perfil, clasificada como *wacke* feldespática (Figura 18), matriz soportada (55%). La matriz es de textura limo arcillosa de coloración crema, el tamaño de grano arena media predomina en el armazón; la muestra está mal calibrada, presentando distribución bimodal de los tamaños de grano, contactos flotantes, de formas prismáticas y angulosas. La composición mineralógica está dada por oxihidróxidos (12%), cuarzo (10%), ortoclasa (6%), albita (6%), poros (4%), biotita (4%), MO (2%) y opacos (1%)

Figura 18

Microfotografía del depósito cuaternario (JDPB-M-03-2).



Nota. Grado V de meteorización: depósito completamente meteorizado. La microfotografía en a está en nicoles paralelos y la b en nicoles cruzados. Qz: cuarzo; Or: ortoclasa; Bt: biotita; Ox: óxido; Pl: plagioclasa; Clay: arcillas; Pseud.: pseudomorfo; MO: materia orgánica.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Las muestras JDPB-M-03-3 y JDPB-M-03-4 no preservaron la estructura durante la preparación, por lo cual solo se pudo identificar la composición mineralógica de las muestras, mostrada en la Tabla 5.

Tabla 5

Resumen composicional del conteo mineral (>300 pts/muestra) y su grado de meteorización asociado.

Estación	Código de campo	Grado de meteorización	Mineral	Fórmula Química	%
JDPB-01	JDPB-M-01-1	I	Cuarzo	SiO ₂	32
			Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	34
			Plagioclasa tipo albita	NaAlSi ₃ O ₈	27
			Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂	5
			Opacos	-	1
	JDPB-M-01-2	I	Cuarzo	SiO ₂	42
			Plagioclasa tipo albita	NaAlSi ₃ O ₈	36
			Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	20
			Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂	1
			Opacos	-	1
JDPB-02	JDPB-M-02-1	V	Matriz	-	36
			Cuarzo	SiO ₂	23
			Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	22
			Poros	-	8
			Plagioclasa tipo albita	NaAlSi ₃ O ₈	4
			Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂	3
			Óxidos de Fe	FeO(OH)·nH ₂ O	2
			Arcillas pseudomorfas	Ver Tabla 6	2

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

			MO	-	1
			Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	1
JDPB-03	JDPB-M-03-1	III	Matriz	-	59
			Cuarzo	SiO_2	11
			Biotita	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH,F)_2$	7
			Plagioclasa tipo albita	$NaAlSi_3O_8$	6
			Arcillas pseudomorfas	<i>Ver Tabla 6</i>	5
			Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	5
			Óxidos de Fe	$FeO(OH) \cdot nH_2O$	4
			Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	1
			Opacos	-	1
			MO	-	1
	JDPB-M-03-2	III	Matriz	-	55
			Óxidos de Fe	$FeO(OH) \cdot nH_2O$	12
			Cuarzo	SiO_2	10
			Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	6
			Plagioclasa tipo albita	$NaAlSi_3O_8$	6
			Poros	-	4
			Biotita	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH,F)_2$	4
			MO	-	2
			Opacos	-	1
	JDPB-M-03-3	III	Cuarzo	SiO_2	50
			Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	25
			Biotita	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH,F)_2$	11
			Plagioclasa tipo albita	$NaAlSi_3O_8$	10
			Óxidos de Fe	$FeO(OH) \cdot nH_2O$	3
			MO	-	1
	JDPB-M-03-4	III	Cuarzo	SiO_2	39
			Plagioclasa tipo albita	$NaAlSi_3O_8$	22

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

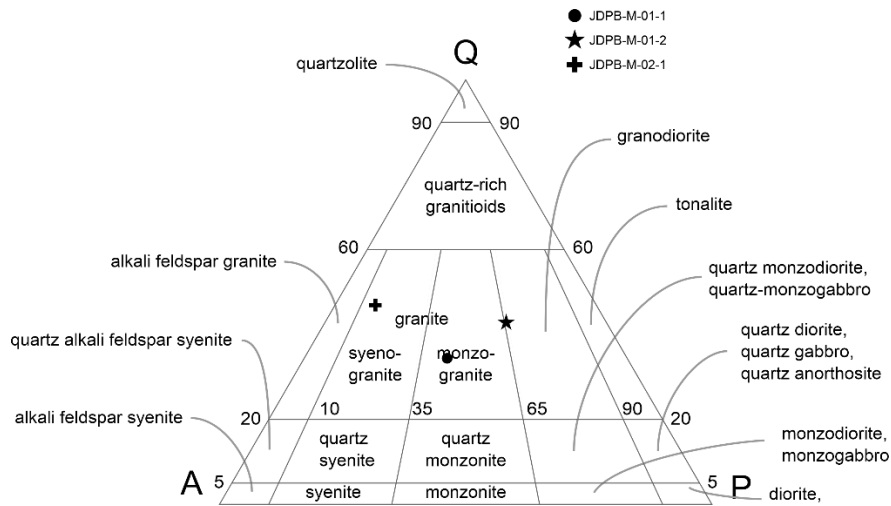
Ortoclasa	KAlSi_3O_8	17
Matriz	Matriz	14
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	6
Óxidos de Fe	$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2

Tanto la clasificación de las rocas plutónicas de la primera estación (roca parental) como las de la roca completamente meteorizada de la segunda estación se realizó según Streckeisen (1976), entendiendo que solo en primer caso se habla de roca ígnea *sensu stricto*. El diagrama de la clasificación de estas muestras se encuentra en la Figura 19. Las variaciones de la composición modal son similares a las encontradas por Rodríguez et al. (2020) en el catálogo de unidades litoestratigráficas, yendo de granodiorita a sienogranito para las más alcalinas. Para las muestras del depósito, debido a la variabilidad del contenido de matriz y presentando un origen sedimentario siendo siliciclásticas, se optó por clasificarlas según el diagrama de Pettijohn (1975), presentándose así dos composiciones: el *wacke* feldespático y la arcosa, como se muestra en la Figura 20. Nótese, que son equivalentes composicionales, y el cambio de su nomenclatura obedece exclusivamente al porcentaje de matriz.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 19

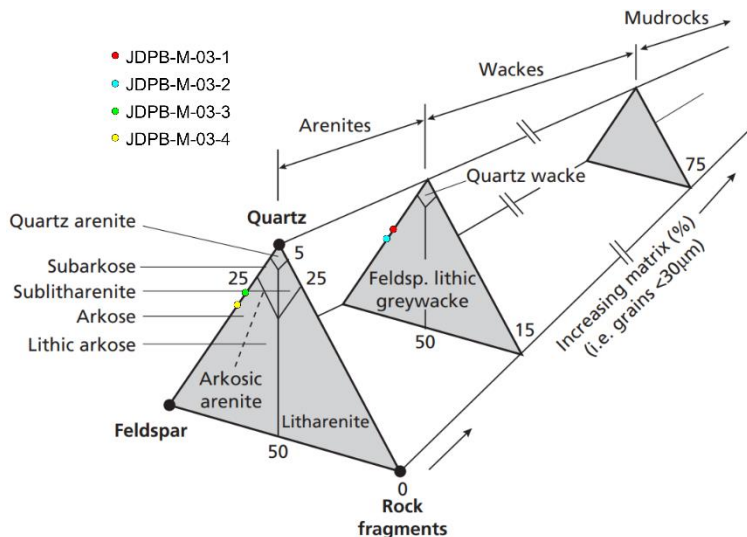
Diagrama QAP según Streckeisen (1976) de las muestras de roca parental y roca meteorizada



Nota. Las muestras JDPB-M-01-1 y JDPB-M-01-2 corresponden a la estación JDPB-01, roca parental fresca. La muestra JDPB-M-02-1 por su parte pertenece a la estación JDPB-02, la roca completamente meteorizada.

Figura 20

Diagrama de clasificación para las muestras del depósito sed., según Pettijohn (1975)



METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

3.7 Difracción de Rayos X (DRX)

Los análisis de difracción de rayos X (DRX) permitieron la identificación de arcillas de los niveles meteorizados descritos en las estaciones JDPB-02 y JDPB-03. Estas muestras fueron enviadas al Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander, donde se determinaron las fases cristalinas más probables, las cuales se encuentran recopiladas en la Tabla 6. Esta información permitió establecer conexiones entre las condiciones climáticas de la zona, las poblaciones de arcillas identificadas y los principales procesos geoquímicos involucrados en la generación de los perfiles de meteorización a lo largo del tiempo, considerando también la influencia de otros agentes en este proceso.

Tabla 6

Resultados de Difracción de Rayos X (DRX) de las muestras

Estación	Nombre de Muestra	Tipo de análisis	Grado de Meteorización	Minerales presentes (%)	
JDPB-02	JDPB-M-02-2	Fracción arcillosa	VI	Ortoclasa	30.24
				Cuarzo	18.96
				Albita	10.79
				Gibbsita	6.48
				Yeso	1.31
				Brucita	<1.00
				Caolinita 1A	21.78
				Moscovita-2M1	7.69
				Vermiculita	2.02
				JDPB-02	JDPB-M-02-3
Cuarzo	31.56				
Albita	7.29				
Gibbsita	4.62				
Moscovita-2M1 férica	20.05				
Vermiculita	<1.00				
Caolinita 1A	N.C.				
Cuarzo	29.30				
JDPB-03	JDPB-M-03-5	Cuantitativo	III	Cuarzo	29.30

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

			Ortoclasa	26.80
			Albita	20.77
			Gibbsita	1.77
			Yeso	1.32
			Brucita	<1.00
			Caolinita 1A	9.12
			Moscovita-2M1	8.36
			Vermiculita	2.09
JDPB-M-03-6	Cuantitativo	III	Ortoclasa	25.05
			Albita	19.93
			Gibbsita	9.23
			Cuarzo	8.41
			Yeso	11.77
			Brucita	1.37
			Caolinita 1A	17.79
			Vermiculita-2M	8.76
			Moscovita-2M1	7.69
JDPB-M-03-7	Fracción arcillosa	III	Cuarzo	41.29
			Ortoclasa	30.16
			Albita	15.61
			Gibbsita	<1.00
			Brucita	<1.00
			Caolinita 1A	5.28
			Moscovita-2M1	4.31
			Vermiculita	1.64
JDPB-M-03-8	Cuantitativo	VI	Ortoclasa	18.80
			Albita	18.22
			Gibbsita	13.50
			Cuarzo	4.23
			Yeso	1.09
			Caolinita 1A	25.68
			Moscovita-2M1	10.65
			Vermiculita-2M	5.02
			Flogopita-1M	2.81

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

3.8 Análisis e interpretación de resultados

En la zona de estudio se han descrito las características mineralógicas tanto de la roca fresca que aflora en las partes altas de la cuenca hidrográfica, correspondiente a la unidad Monzogranito de Santa Bárbara (estación JDPB-01), como del perfil de meteorización que desarrolla la roca en el ambiente de páramo (estación JDPB-02). Por otro lado, se realizó la descripción y se definieron las características mineralógicas del depósito cuaternario que aflora en la cuenca hidrográfica (estación JDBP-03). Del depósito cuaternario se tiene que la forma angulosa y tamaño grueso de los granos de cuarzo y la presencia de plagioclasas y feldespatos potásicos aún conservados permite establecer una fuente cercana de los sedimentos que correspondería a la unidad Monzogranito de Santa Bárbara.

3.8.1 *Relación de la meteorización con los parámetros hidroclimáticos y el fracturamiento*

La precipitación promedio de la zona de estudio es de 1200 mm/año, la temperatura promedio anual es de 9°C, con oscilaciones diarias de 5°C (en la madrugada) hasta 12°C (al medio día) y se encuentra a una altura de ~3500 m.s.n.m., por ello, clasificada como páramo semihúmedo tal como se explicó en la sección 3.4 sobre los parámetros hidroclimáticos.

Usando el diagrama de Louis Peltier (Figura 21) se puede relacionar los tipos de meteorización y sus intensidades con las variables hidroclimáticas. Según este diagrama y las condiciones climáticas de la zona de estudio se presenta: a) meteorización química moderada b) meteorización mecánica débil y c) la acción física-química combinada en este régimen hidroclimático genera congelación-descongelación y meteorización química moderada.

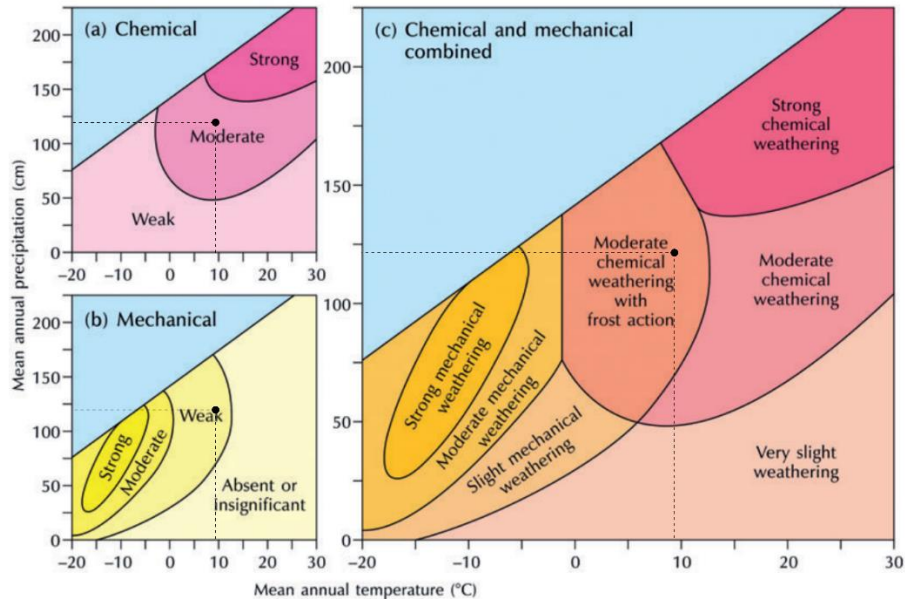
Al comparar los resultados del diagrama con las observaciones de campo y las características mineralógicas del material parental se precisa que: el inciso a) corresponde a lo evidenciado a nivel de sección delgada, afloramiento y a los procesos geoquímicos identificados

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

explicados en la siguiente sección, pues la intensidad de la alteración fue parcial en todos los minerales, nunca pervasiva, por sectores y con preservación de plagioclasas y ortoclasa; incluso con preservación de estructuras como en el caso de la estación JDPB-03. El inciso b) habla de una meteorización mecánica débil, sin embargo, se observa que la roca fresca se encuentra afectada por fracturas, debido a la acción de fallas, por lo tanto, no se puede hablar de una meteorización mecánica débil en la zona de estudio. Finalmente el inciso c) especifica que por las condiciones climáticas de la zona se puede presentar un mecanismo de congelación-descongelación (gelifracción), lo cual se podría correlacionar con la geomorfología glacial registrada en la zona de estudio (INGEOMINAS-UIS, 2014) y con la apertura de las diaclasas de 1 cm promedio y hasta 8 cm registradas en la (Tabla 2), ya que, al momento de congelarse el agua y aumentar su volumen, se puede generar mayores aperturas de las fracturas preexistentes, así como bloques redondeados o *corestones* (Figura 5)(Twidale & Campbell, 2005). Se reconoce entonces un control estructural que ejercerían las fallas cercanas, Falla Santana y Falla Sevilla, en la generación de las diaclasas abiertas en la gelifracción (meteorización física) y la densidad de estas para aumentar las superficies expuestas al agua meteórica (catalizando la meteorización química).

Figura 21

Diagrama de la relación clima-meteorización de Louis Peltier



Nota. Modificado de Hugget (2017). El dato de precipitación está en cm/año, por lo que se requiere conversión.

3.8.2 *Relación de las arcillas identificadas y los procesos de meteorización.*

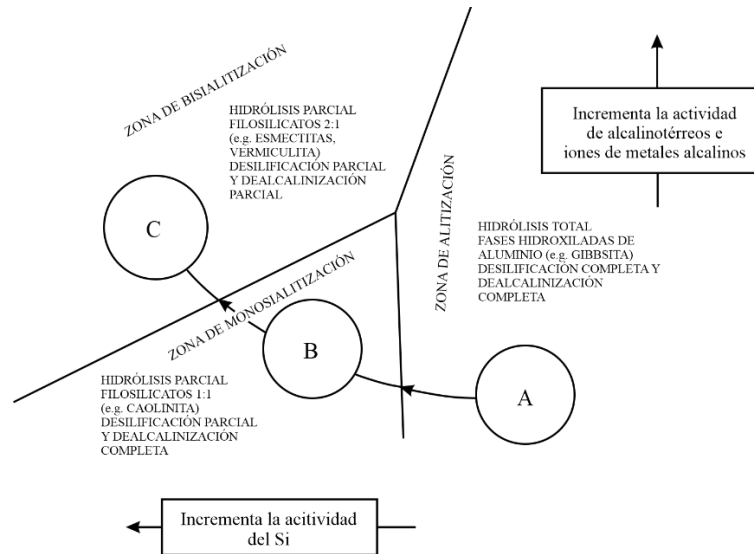
En la estación JDPB-02 - grado de meteorización V se presentó predominancia de mica moscovita y gibbsita (20% y 4.62%, respectivamente), con cantidades muy bajas de vermiculita (<1%), reconociendo la secuencia bien establecida de mica-illita-vermiculita (Macías & Camps-Arbestain, 2013), con la escasa vermiculita como producto final, se sugiere que la meteorización aún se encuentra en fases tempranas; aunado a lo anterior, la presencia apreciable de gibbsita evidencia de procesos de alitización, pues esta tiende a formarse cuando aún la actividad del Si es baja (Pédro, 1983)(Figura 22). Suprayaciendo, en el grado de meteorización VI, ya aparece la caolinita, arcilla indicadora del proceso intermedio denominado monosialitización, que se da a mayores actividades del Si. Teniendo en cuenta la poca cantidad de arcillas expansibles (vermiculita 2%) y los tiempos de permanencia necesarios para los dos procesos geoquímicos

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

(alitización y mono-alitización) se podría deducir que el estado de meteorización del suelo aún no es maduro; esto quiere decir que la solución meteorizante no llega a “estancarse” en el perfil pero tampoco lo lixivias rápidamente, como se explica en Macías & Camps-Arbestain (2013).

Figura 22

Representación esquemática de tres zonas de formación mineral en los suelos



Nota. Modificado y adaptado de Macías & Camps-Arbestain (2020)

Por su parte, en la estación JDPB-03, se presentó principalmente caolinita, la cual tiene valores de 5.28% a 9.12% para los niveles más arenosos y de 17.79% a 25.68% para los más limo-arcillosos, correlacionada a la gibbsita, con el mismo comportamiento, aunque en menor cantidad, presentándose en un 1.77% a <1% en los niveles arenosos y 9.23% a 13.5% en niveles limo-arcillosos. La arcilla expansible (vermiculita) está en cantidades considerables (hasta 8.76%). La ocurrencia predominante de caolinita, que hace parte del grupo de las kanditas (filosilicatos secundarios tipo 1:1), indica que el proceso predominante es la monosialitización, y aunque esté presente la vermiculita y esta sea indicadora de procesos de bisialitización es imperativo comprender que esta ocurre de manera localizada en los niveles más impermeables debido que permiten menos lixiviación y, consecuentemente, aumentar el ratio Si/Al de tal manera que se

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

produzcan los minerales propios de la bisialitización (Macías & Camps-Arbestain, 2020), para una completa bisialitización se requerirían propiedades hidrofísicas que permitan tiempos muy altos de residencia de la solución meteorizante, características que no tienen este tipo de materiales en la zona según el estudio de Patiño (2021a), y se evidencia en la incompleta transformación de micas a vermiculita y en la ausencia de minerales del grupo de las esmectitas. Ahora, en consideración de la naturaleza estratificada del depósito, o sea, las intercalaciones arenosas y limoarcillosas, era de esperarse que estos últimos presentasen mejor capacidad para retener el agua y, consecuentemente, favorecer las saturaciones de Si que lleven a la bisialitización localizada, son estos niveles los que presentan mayor cantidad de vermiculita, así mismo la formación de esta *per se* cataliza la captación de agua a nivel de estrato y actúa como un sello intra capa de las soluciones meteorizantes.

Al compararse la roca meteorizada con el depósito cuaternario, a nivel mineralógico primario, alteraciones y texturas, se encuentra que comparten muchas de sus características. Esto sugiere que se tiene un sistema en el que coexiste la pedogénesis y la acreción sedimentaria (Almond & Tonkin, 1999), una regeneración casi continua con nuevos depósitos que cubren suelo existente y pasan a formar el nuevo material parental.

Definir una tendencia geoquímica general no es sencillo, debido a la heterogeneidad en los procesos geoquímicos identificados. Macías & Camps-Arbestain (2020) reconocen tres principales caminos geoquímicas que pueden tener los suelos: la tendencia ácida, la alcalina, la reducida y aproximadamente neutra. Cuando coexisten procesos como la monosialitización, la alitización y además hay presencia significativa de sesquióxidos de Fe como la goetita y la hematita; lo que junto constituye lo denominado fer-mono-sialitización, se habla de un sistema residual (Macías & Camps-Arbestain, 2020), *i.e.*, la etapa tardía de la meteorización de un sistema ácido (ver Figura

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

23). Una característica particular que se halló en sección delgada es que la biotita se encontraba, además de oxidada en muchos individuos, con alteración clorítica. Se ha observado que la formación de clorita secundaria en suelos puede estar relacionada a niveles bajos de pH que, además, inhiben la descomposición de la MO (Kome et al., 2019; Schulten et al., 2020); característica común de los suelos de páramo (Patiño et al., 2021b). Teniendo en cuenta lo anterior, es plausible asignarle una tendencia ácida a los suelos y al depósito de esta zona.

Teniendo en cuenta los procesos geoquímicos, la tendencia del sistema y las características del material parental se puede hacer inferencia sobre los aportes de nutrientes y el nivel de actividad fisicoquímica. En teoría, el aporte potencial al suelo de estas litologías está sujeto principalmente al feldespato y a las micas, los feldespatos aportantes de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y las micas K^+ , Mg^{2+} , Na^+ y Fe^{2+} (Jaramillo, 2002). No obstante, en la realidad, no todos los iones llegan a ser biodisponibles, algunos quedan inaccesibles para la vegetación debido a que, a condiciones determinadas de, por ejemplo, el pH, adsorben los nutrientes y los vuelven difícilmente intercambiable hacia la vegetación, disminuyendo así el *pool* nutricional, las reacciones de adsorción en las que intervienen minerales son a menudo más importantes en el control de la disponibilidad de elementos nutritivos para las plantas que la liberación de elementos nutritivos por meteorización mineral (Kome et al., 2019).

La vermiculita (y otros minerales como el grupo de la esmectita), presente en el perfil, posee una carga permanente y facilita sitios para retener en su forma catiónica al Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ ; estos nutrientes se mantienen unidos a la superficie mineral mediante complejos, quedando disponibles para su absorción por las raíces vegetales a través de mecanismos de difusión y flujo de masas. Se ha observado que, la presencia de vermiculita genera más liberación de K^+ biodisponible en comparación a los suelos donde haya mayor dominancia de clorita-illita (Ghiri et

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

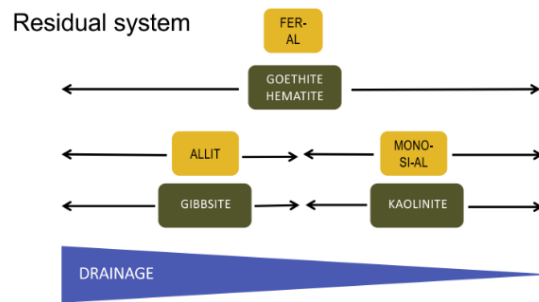
al., 2011), en adición, la alteración incipiente y parcial de los feldespatos observadas causarían que el K^+ en los sitios de los feldespatos sean reemplazados por Mg^{2+} y Ca^{2+} durante el proceso de alteración, aumentando su biodisponibilidad, como se explica en Kome et al. (2019).

En contraste, los minerales con carga variable, baja cristalinidad y reducida capacidad de intercambio catiónico o aniónico, como los sesquióxidos de hierro (Goetita y Hematita), tienden a exhibir una mayor afinidad por los aniones, especialmente en condiciones ácidas donde pueden adsorber $H_2PO_4^-$ y NO_3^- (Kome et al., 2019). No obstante, el nitrógeno es excepcional, pues es muy dependiente del contenido de arcillas; considerando que las plantas no solo lo toman a manera de nitrato (NO_3^-) sino también como iones sustituibles de amonio (NH_4^+). En suelos como el presentado, donde prima la caolinita y los sesquióxidos, se retienen grandes cantidades del NO_3^- a razón de la superficie de carga variable que presentan estos minerales (Kome et al., 2019). Por otra lado, el NH_4^+ es retenido por minerales con carga permanente (*e.g.* vermiculita), una gran cantidad de este no es fácilmente sustituible por aislarse entre las capas de tetraedros y octaedros del filosilicato (Mamo et al., 1993), pero otra parte compite con el K^+ (con el que comparte similitudes de tamaño iónico y valencias) por el puesto en la estructura cristalina y genera que, cuando el K^+ es abundante en la solución, se tenga más NH_4^+ libre para las plantas, explica Kome et al. (2019).

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Figura 23

Procesos de neoformación y sus productos en la etapa residual



Nota. Allit: alitización; mono-si-al: mono-sialitización; fer: sigla que se añade a los dos procesos anteriores cuando se forma ferrihidrita, goethita o hematites. Adaptado de Macías & Camps-Arbestain (2020).

4. Conclusiones

Se definieron y caracterizaron los diferentes grados de meteorización de los perfiles presentados en roca fresca, roca meteorizada y depósito cuaternario. En roca fresca se identificó un perfil ligeramente meteorizado (grado II). La roca fresca presenta dos variaciones locales de litologías, monzogranito y granodiorita y pertenece a la unidad Monzogranito de Santa Bárbara. En roca meteorizada se registró el material ígneo completamente meteorizado (grado V) y el suelo residual generado (grado VI), ambos con presencia de cuarzos y feldespatos relictos, en matriz limoarcillosa (grado V) y arcillosa (grado VI). El depósito cuaternario presentó dos grados de meteorización, moderadamente meteorizado (grado III) y el suelo residual (grado VI); el grado III consta de estratificaciones de materiales finos y gruesos cuarzofeldespáticos con niveles oxidados y el grado VI corresponde a material relicto cuarzofeldespático rico en materia orgánica y raíces.

La caracterización petrográfica de los afloramientos permitió clasificar la roca fresca en dos litologías: monzogranito con alteraciones de clorita (en biotita), sericita (en albita), caolinita (en ortoclasa) y oxihidróxidos metálicos; y granodiorita con alteraciones de sericita (en

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

plagioclasa), caolinita (en ortoclasa), goetización en biotitas, hematita y otros oxihidróxidos. La roca meteorizada se clasificó como sienogranito con alteraciones de sericita (en plagioclasa), oxihidróxidos metálicos, MO y pseudomorfismos de arcillas. El depósito cuaternario presenta niveles de composición *wacke* feldespática, con alteraciones de oxidación pervasiva de ferromagnesianos (biotita), caolinita (en ortoclasa), pseudomorfismos de arcillas y MO; y niveles, igualmente de composición *wacke* feldespática con presencia principal de pseudomorfismos de arcillas y oxihidróxidos, caolinita (en ortoclasa) y MO.

La precipitación media anual del área de estudio es de 1200 mm/año con una temperatura promedio de 9°C. La unidad hidrográfica se clasifica como un páramo semihúmedo. La precipitación y temperatura permiten concluir que en la zona se presenta una meteorización química moderada, con presencia de procesos gelifracción. Asimismo, las observaciones de campo permiten establecer que la roca se encuentra afectada por fallas geológicas que facilitan el proceso de gelifracción, generando meteorización física moderada, que posteriormente, favorece la meteorización química.

La meteorización química moderada, predicha por las variables hidroclimáticas, es coherente con el análisis geoquímico de arcillas, por el cual se identificaron los principales procesos pedogenéticos: alitización y fer-mono-alitización. Se encontró que la tendencia geoquímica de los suelos generados sigue la ruta ácida, encontrándose en los afloramientos en su fase residual. Finalmente, las relaciones entre las arcillas y la mineralogía primaria *a priori* favorecen la disponibilidad en los suelos de NO_3^- , NH_4^+ , H_2PO_4^- , K^+ , Na^+ y Ca^{2+}

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

Referencias Bibliográficas

- Almond, P.C., Tonkin, P.J., (1999). Pedogenesis by upbuilding in an extreme leaching and weathering environment, and slow loess accretion, south Westland, New Zealand. *Geoderma* 92, 1–36. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00016-6)
- Bejarano, D., Navas, A. (2018). *Análisis estructural de los patrones de fracturamiento y su relación con el flujo de aguas subterráneas en inmediaciones del municipio de Tona, macizo de Santander*. [Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Cetina, M. A. (2019). *Modelo Hidrodinámico de Flujos Subterráneos en Sistemas Cársticos y su Interacción con las Rocas Adyacentes. Caso de Estudio: Parte Alta de la Cuenca del Río de Oro, Departamento de Santander* [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander.
- Celis, A.D. (2022). *Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo*. [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander.
- Colegial Gutiérrez, J. D., Forero Quintero, M.C., Fuentes Rueda, M. A., & Gómez Isidro, S. (2017). Tipificación de perfiles de meteorización de rocas cristalinas al oriente de Bucaramanga y

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

- definición de propiedades hidrogeológicas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (41), 15-29.
<https://doi.org/10.15446/rbct.n41.59347>
- Córdova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debidos al uso de datos mensuales, diarios y horarios. *Aqua-LAC*, 5(2), 14–22.
- Dinis, P., Garzanti, E., Vermeesch, P., & Huvi, J. (2017). Climatic zonation and weathering control on sediment composition (Angola). *Chemical Geology*, 467, 110–121.
doi:10.1016/j.chemgeo.2017.07.030
- Duarte-Abadía, B., & Boelens, R. (2016). Disputes over territorial boundaries and diverging valuation languages: the Santurban hydrosocial highlands territory in Colombia. *Water International*, 41(1), 15–36. doi:10.1080/02508060.2016.1117271
- Ghiri, M.N., Abtahi, A., Karimian, N., Owliaie, H.R. and Khormali, F. (2011) Kinetics of Non-Exchangeable Potassium Release as a Function of Clay Mineralogy and Soil Taxonomy in Calcareous Soils of Southern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57, 343-363.
<https://doi.org/10.1080/03650340903440144>
- Gómez Ríos, V. (2022). *Evaluación del comportamiento de la evapotranspiración en una unidad hidrográfica no intervenida de ecosistema de páramo*. [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander
- Hugget, R. (2017). *Fundamentals of Geomorphology*. (4a ed.). Routledge
- INGEOMINAS - Instituto Colombiano de Geología y Minas & UIS - Universidad Industrial de Santander (2007). *Memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en el Macizo de Santander*. Bucaramanga, Colombia.
- Jaramillo, D.F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

- Kome, G.K., Enang, R.K., Tabi, F.O. and Yerima, B.P.K. (2019). Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: A Review. *Open Journal of Soil Science*, 9, 155-188.
<https://doi.org/10.4236/ojss.2019.99010>
- Macías, F., & Camps-Arbestain, M. (2020). Chapter Six - A biogeochemical view of the world reference base soil classification system: Homage to Ward Chesworth. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 160, pp. 292-342). doi:10.1016/bs.agron.2019.11.002
- Mamo, M., Taylor, R.W. and Shuford, J.W. (1993). Ammonium Fixation by Soil and Pure Clay Minerals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24, 1115-1126.
<https://doi.org/10.1080/00103629309368864>
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M., Kammer, A., Dimaté, C., & Rodríguez, F. (2006). Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25(2).
- Patiño, S. (2021a). *Evaluación del efecto del uso del suelo sobre sus propiedades hidrofísicas en ecosistema de páramo asociadas a los servicios de suministro y regulación hídrica*. [Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo-Ocaña, R., Buytaert, W., & Ochoa-Tocachi, B. F. (2021b). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *CATENA*, 202, 105227.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
- Pedro, G. (1983). Structuring of some basic pedological processes. *Geoderma*, 31(4), 289–299.
doi:10.1016/0016-7061(83)90042-3
- Pettijohn, F.J. (1975). *Sedimentary Rocks*. (2^a ed.). Harper and Row Publishers

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

- Rodríguez, G., Zapata, G., Arango, M. I., & Correa Martinez, A. M. (2020). Monzogranito de Santa Bárbara. En *Catálogos de las unidades litoestratigráficas de Colombia: Macizo de Santander* (Vol. 1). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585279445.3>
- Rodríguez Castiblanco, E. A., Sandoval Ramírez, J. H., Chaparro Cordón, J. L., Trejos González, G. A., Medina Bello, E., Ramírez Hernández, K. C., Castro Marín, E., Castro Guerra, J. A., & Ruiz Peña, G. L. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/34>
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1:400.000. *Memoria explicativa. INGEOMINAS*.
- Schulten, H., & Leinweber, P. (2000). New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. *Biol Fertil Soils* 30, 399–432. <https://doi.org/10.1007/s003740050020>
- SGC - Servicio Geológico Colombiano & UIS - Universidad Industrial de Santander. (2014). *Mapa Geomorfológico Aplicado a movimientos en Masa Plancha 121 Cerrito* [Mapa]. 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Streckeisen, A. (1976). To Each Plutonic Rock Its Proper Name. *Earth-Science Reviews*, 12, 1-33. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)
- Tovar, C., Arnillas, C. A., Cuesta, F., & Buytaert, W. (2013). Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions. *PLOS ONE*, 8(5), 1–12. [doi:10.1371/journal.pone.0063634](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063634)

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

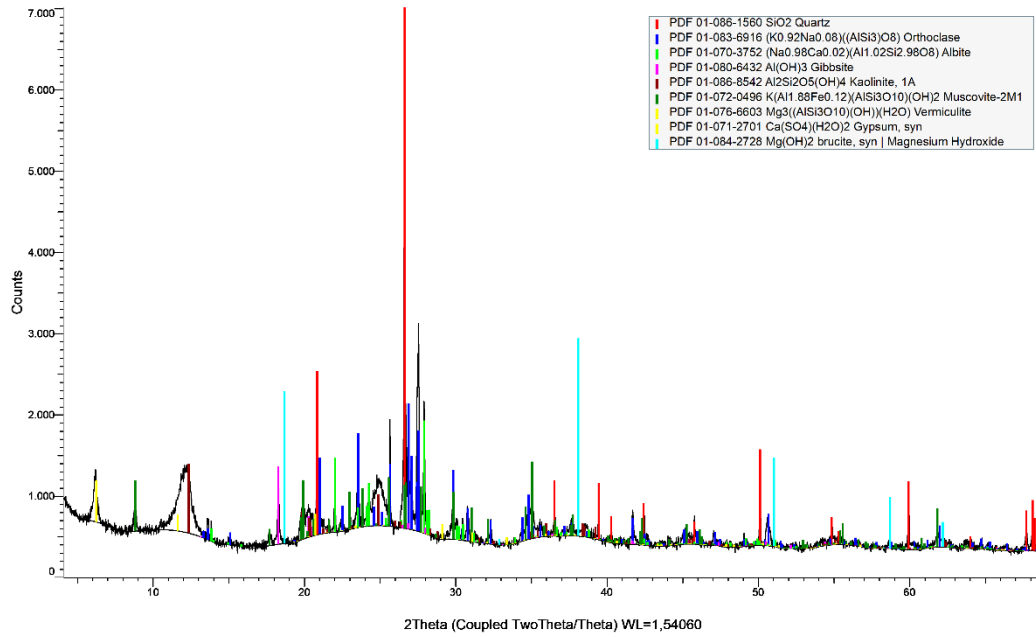
- Twidale, C. R. and Campbell, E. M. (2005) *Australian Landforms: Understanding a Low, Flat, Arid and Old Landscape*. Rosenberg Publishing.
- Verrecchia, E. P., & Trombino, L. (2021). *A visual atlas for soil micromorphologists*. Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-67806-7>
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., Jaramillo, L., & Vargas, R. (1970). *Geología de la Plancha 110 Pamplona* [Mapa geológico]. Escala 1:100.000. INGEOMINAS.
- Ward, D.E, Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., Gómez, E. (1973). *Memoria explicativa del mapa geológico de Colombia: Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, escala 1:100.000*. INGEOMINAS.
- Ward, D.E., Goldsmith, R., U.S. Geological Survey, Cruz J., Jaramillo, L., Vargas, R. (1977). *Geología de la Plancha 121 Cerrito* [Mapa Geológico]. Escala 1:100.000. INGEOMINAS

METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

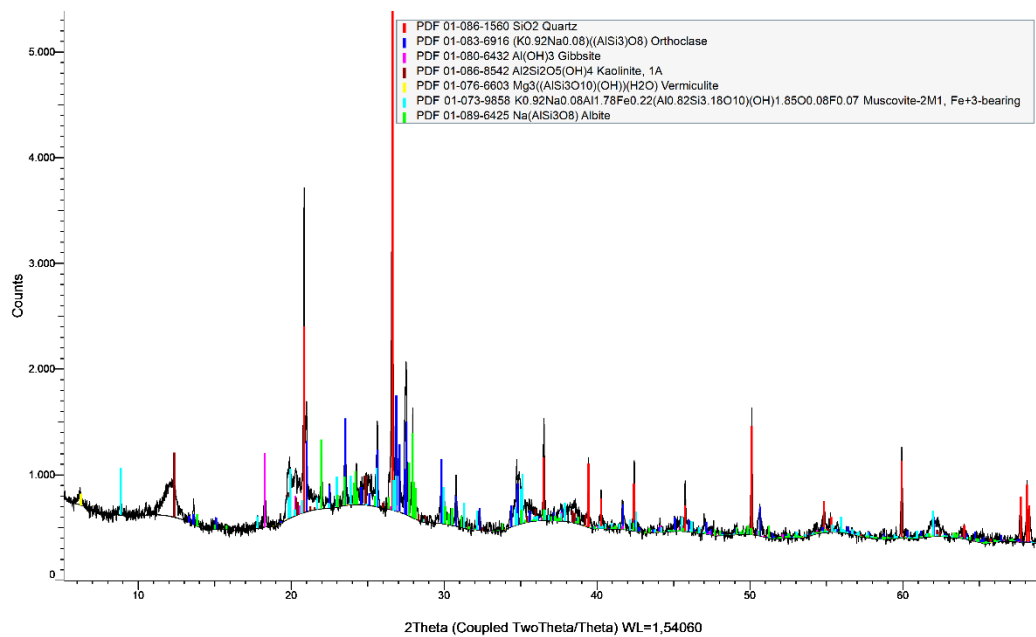
Apéndices

Apéndice A Difractogramas de las 6 muestras analizadas

JDPB-M-02-2

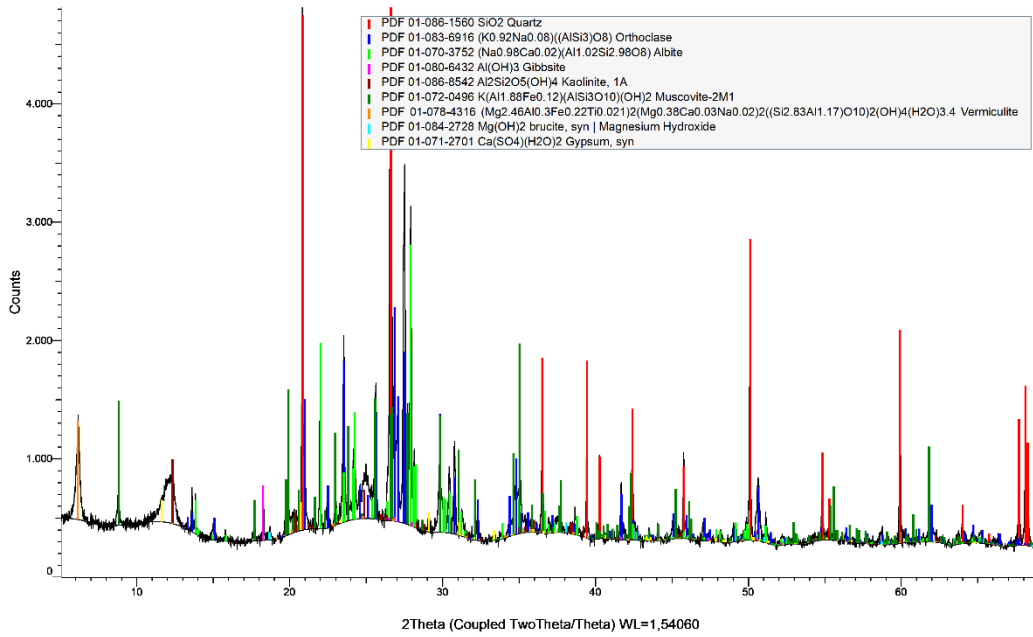


JDPB-M-02-3

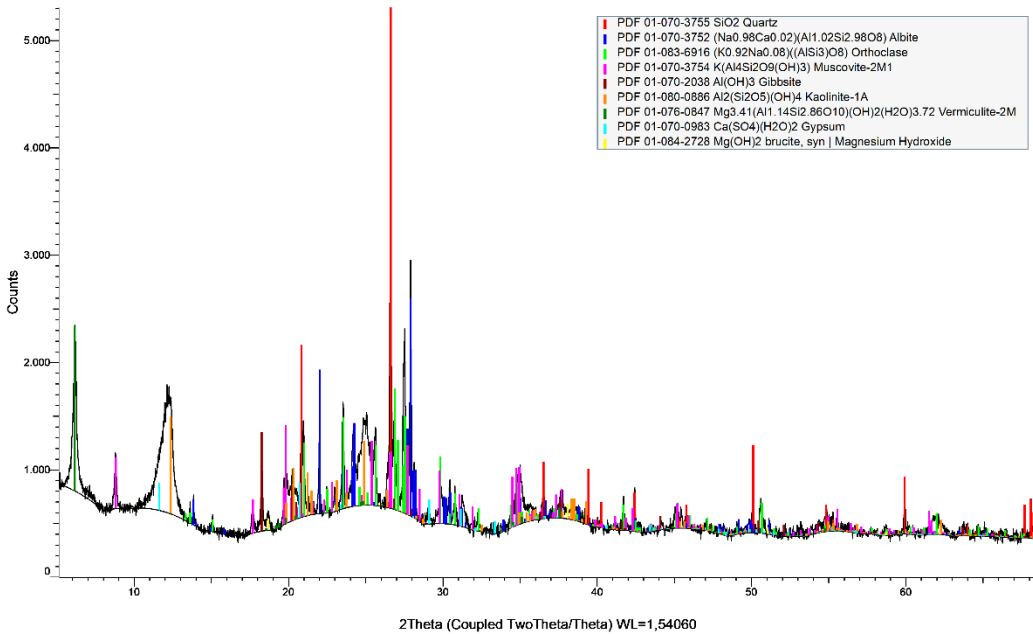


METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

JDPB-M-03-5

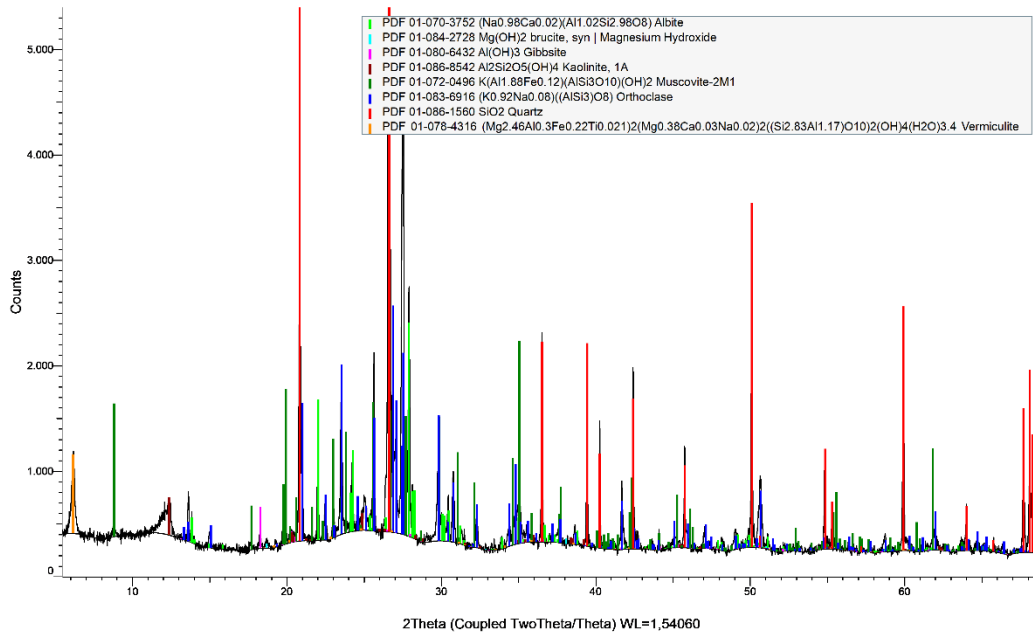


JDPB-M-03-6



METEORIZACIÓN EN EL PÁRAMO DE BERLÍN

JDPB-M-03-7



JDPB-M-03-8

