

Modelo Geológico para un área de interés en el Complejo Quebradagrande como insumo para los estudios de Factibilidad y el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de un Proyecto Hidroeléctrico

Carolina Castro Amaya

Trabajo de grado en modalidad de práctica empresarial presentado como requisito para optar al título de Geóloga



UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE GEOLOGIA
Manizales, Caldas
Abril, 2022

Modelo Geológico para un área de interés en el Complejo Quebradagrande como insumo para los estudios de Factibilidad y el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de un Proyecto Hidroeléctrico

Carolina Castro Amaya

Director institucional:

Isabel Cristina Villada Arias

Esp. En Sistemas de Información Geográfica

Director académico:

John Jairo Cardona Ríos

Geólogo

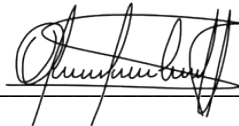
**UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE GEOLOGIA**

Manizales, Caldas

Abril, 2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

APROBADO



John Jairo Cardona

Director de trabajo grado

DEDICATORIA

A mis padres, porque con su amor y apoyo incondicional, me han llevado de la mano en el camino de la vida, siendo mi mayor ejemplo y motor para nunca rendirme y cumplir todos mis sueños.

A mi compañero de vida, mi hermano porque es la luz de mis ojos y quien me inspira día a día a ser mejor.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Pi Épsilon Proyectos de Ingeniería Especializadas S.A.S por darme la oportunidad de desarrollar mi práctica académica y a mis compañeros de trabajo por permitirme aprender y construir conocimiento a su lado.

A Isabel Cristina Villada mi directora institucional por darme su confianza y poder hacer parte de su equipo de trabajo y a John Jairo Cardona Ríos mi director académico, agradezco su paciencia y constancia durante todo mi proceso académico.

A mi alma mater por abrirme las puertas del saber y ayudar a cumplir mis metas. A mis docentes por su dedicación y empeño al compartir su conocimiento y formarme como profesional.

A mis compañeros y amigos, pues juntos vivimos este proceso formativo, brindándonos apoyo y compañía forjando una gran amistad.

Agradezco en especial a mi familia por siempre alentarme a mejorar día a día, gracias por sus consejos y enseñanzas, por hacer de mí una persona de valores.

RESUMEN

En un área de interés sobre el Complejo Quebradagrande al NW del departamento de Caldas, se llevó a cabo un modelamiento geológico para un área aproximada 12,68 km², orientado a representar la geometría y relación espacial de las unidades encontradas en la exploración geológica, a partir de los resultados obtenidos en una campaña de exploración del subsuelo con el método de perforación a rotación con broca diamantina. Dichas perforaciones, complementadas con la cartografía superficial suministraron información suficiente para construir columnas y perfiles estratigráficos, que permitieron proyectar y correlacionar las unidades aflorantes, para así proponer un modelo geológico, el cual será insumo base para un proyecto hidroeléctrico en la zona de estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que la unidad aflorante se relaciona en su totalidad con el Litodema Volcánico del Complejo Quebradagrande, compuesto por limolitas, tobas de cristales, tobas líticas, tobas laminadas y en menor proporción algunos niveles de areniscas. De igual manera, fue posible identificar dos regímenes deformativos: un primer evento de régimen dúctil posiblemente para finales del Cretácico Inferior, asociado al cierre de una cuenca marginal, generando pliegues escalonados y algunos niveles de protomilonitas en la unidad aflorante, y un segundo evento para el Cretácico Superior de régimen frágil sobreimpuesto a la deformación dúctil, como producto de deslizamientos dextrales asociados a la actividad de la Placa Caribe, generando un ambiente transpresivo en el que tiene lugar las estructuras relacionadas al Sistema de Fallas Romeral, las cuales han producido alto fracturamiento y zonas de cizalla frágil en la zona de estudio.

Palabras claves: Exploración, Modelo Geológico, Complejo Quebradagrande, Sistema de Fallas Romeral, régimen dúctil, régimen frágil.

ABSTRACT

In an interest area on the Quebradagrande Complex, to the NW of the Caldas state, a geological modeling was realized for an approximate area of 12.68 Km², Oriented to represent of the found units geometry and spatial relationship in the geological exploration, starting off the results obtained from a subsoil exploration campaign, by diamantine bit rotation drilling method. These drillings were supplemented with superficial cartography, of this form contributed enough information for build stratigraphic columns and profiles that allowing to project and correlation the outcropping units, and propose a geological model as base input for a hydroelectric project in study zone.

According to the results obtained, it was determined that the outcropping unit is fully related to the Quebradagrande Complex Volcanic Lithodema, composed by siltstones, crystalline tuffs, lithic tuffs, laminated tuffs and, and less proportion some sandstone levels. Likewise, it was possible to identify two deformative regimes: a first ductile regime event probably Lower Cretaceous age, associated to closure of a marginal basin, generating echelon folds and some protomylonites levels at outcropping unit, and a second brittle regime event of Upper Cretaceous age overlayed to ductile strain, this event product of dextral sliding associated to Caribbean Plate activity, generating a transpressive environment where do they originated the related structures with Romeral Fault System, which have generated high fracturing and brittle shear zones at study zone

Keywords: *Exploration, Geological Model, Quebradagrande Complex, the Romeral Fault System, ductile regime, brittle regime*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	JUSTIFICACIÓN	4
3.	OBJETIVOS	5
	3.1 Objetivo general	5
	3.2 Objetivos específicos.....	5
4.	METODOLOGÍA	6
	4.1 Etapa I. Recopilación y revisión de la información	6
	4.2 Etapa II. Exploración del subsuelo.....	6
	4.2.1 Litología	9
	4.2.2 Horizonte de Meteorización	10
	4.2.3 Resistencia.....	11
	4.2.4 RQD.....	12
	4.3 Etapa III. Análisis e interpretación de la información	13
	4.4 Etapa IV. Modelamiento de datos	13
5.	MARCO GEOLÓGICO.....	15
	5.1 Antecedentes	15
	5.2 Geología regional	17
	5.2.1 Estratigrafía	19
	Complejo Arquía (PZaea, PZaes)	19
	Complejo Quebradagrande ((K1qgsc, K1qgv)	20

	Gabros asociados al Complejo Quebradagrande (K1qgg)	21
	Ultramafitas de Romeral (K1urp, K1urs)	22
	Formación Amagá (E3ai, E3am)	23
	Rocas hipoabisales porfiríticas (pórfidos andesíticos/dacíticos, N2dh/N2d).....	24
	Depósitos Cuaternarios	24
5.2.2	Geología Estructural.....	25
	Sistemas de Fallas de Romeral.....	26
	Falla de San Jerónimo:	27
	Falla de La Merced (Falla Silvia – Pijao)	27
	Falla de Romeral	27
	Falla de Salamina	28
	Falla Cauca-Almaguer	28
6.	GEOLOGÍA LOCAL	29
6.1	Unidades litológicas	29
6.1.1	Complejo Quebradagrande (K1qgsc, K1qgv).....	29
6.1.2	Gabros Asociados al Complejo Quebradagrande (K1qgg)	36
6.1.3	Formación Amagá- miembro Inferior	36
6.1.4	Depósitos de vertiente (Q2v).....	37
6.1.5	Depósitos Aluviales (Qal)	38
6.2	Geología Estructural.....	39

6.2.1	Fallas	41
	Falla Romeral	41
	Falla Salamina Oeste.....	42
	Fallas menores.....	43
6.2.2	Diaclasas.....	44
6.2.3	Estratificación.....	45
7.	EXPLORACION DEL SUBSUELO	46
7.1	Perforaciones.....	46
7.1.1	PS-PR-OD-01	46
7.1.2	PS-PR-CM-01	48
7.1.3	PS-PR-CO-01	50
7.1.4	PS-PR-CO-02	52
7.1.5	PS-PR-CO-03	54
7.1.6	PS-PR-CO-04	56
7.1.7	PS-PR-CO-05	58
7.1.8	PS-PR-CO-06	60
7.1.9	PS-PR-CO-07	62
7.1.10	PS-PR-CO-08.....	64
8.	ANALISIS ESTRUCTURAL.....	67
9.	MODELO GEOLOGICO	72
10.	CONCLUSIONES	77

11.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	79
12.	ANEXOS... ..	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	2
Figura 2. Perfil de la conducción con perforaciones asociadas. Tomado (Pi Epsilon, 2021).....	8
Figura 3. Esquema de perforación con corona de diamante (Marjoribanks, 2010).....	9
Figura 4. Corte geológico esquemático entre las cordilleras central y Occidental a 5° 25' N. modificado de (González, 1993).....	16
Figura 5. Perfil de reconocimiento a través del Complejo Quebradagrande entre las fallas Salamina y Romeral tomado de (Álvares, 1995)	16
Figura 6. Geología regional de la zona de estudio. Modificado de González et al. (1980).....	18
Figura 7. Secuencia de rocas sedimentarias intensamente fracturadas.....	30
Figura 8. Afloramiento de limolitas en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2.	31
Figura 9. Limolitas encontradas en las perforaciones.	32
Figura 10. Grauvaca encontrada en perforación PS-PR-CO-02.....	32
Figura 11. Afloramiento de toba de cristales diaclasados, en horizonte de meteorización IIB y resistencia R3, sector obras de derivación.	33
Figura 12. Protomilonitas encontradas en las perforaciones.	35
Figura 13. Depósitos de vertientes en la zona de estudio. a.	37
Figura 14. Depósito Aluvial asociado al río Pozo..	38
Figura 15. Geología Local de la zona de estudio.....	40
Figura 16. Rasgos geomorfológicos identificado en mapa de sombras (Hillshade) de la zona de estudio.....	41
Figura 17. Rasgos geomorfológicos del trazado de la Falla de Romeral, tomado de google earth.....	42
Figura 18. Rasgos geomorfológicos en el trazo de la falla Salamina Oeste, tomada de google earth.....	43

Figura 19. Proyección del Trazo de la Falla el Pozo en la zona de estudio, donde se encuentran hombreras de falla Alineadas.....	44
Figura 20. Diagrama de rosas asociado a fallas en la zona de estudio	44
Figura 21. Localización en vista de perfil de las perforaciones ejecutadas., tomada de (Pi Epsilon, 2021).....	46
Figura 22. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-OD-01. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	47
Figura 23. Perforación PS-PR-OD-01. a) Depósito Aluvial clasto soportado, Caja #2. b) Depósito Aluvial clasto soportado, Caja #6	48
Figura 24. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CM-01. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	49
Figura 25. Perforación PS-PR-CM-01.....	50
Figura 26. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-01. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	51
Figura 27. Perforación PS-PR-CO-01..	52
Figura 28. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-02. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	53
Figura 29. Perforación PS-PR-CO-02.	54
Figura 30. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-03. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	55
Figura 31. Perforación PS-PR-CO-03.	56
Figura 32. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-04. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	57
Figura 34. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-05. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	59
Figura 35. Perforación PS-PR-CO-05	60

Figura 36. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-06 (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	61
Figura 37. Perforación PS-PR-CO-06	62
Figura 38. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-07 (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR).....	63
Figura 39. Perforación PS-PR-CO-07	64
Figura 40. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-08.....	65
Figura 41. Perforación PS-PR-CO-08	66
Figura 42. Elipse de deformación para un sistema tranpresivo con componente de tipo dextral para la zona del Proyecto (modificado de Rosello, 2009)).....	67
Figura 43. Modelo de fracturamiento interpretado para la zona del Proyecto Salamina.....	68
Figura 44. Perfil interpretativo de fallas principales para la zona de estudio.....	69
Figura 45. Clasificación Pliegues zona de estudio	70
Figura 46. Vista interpretativa de perfil y en planta asociada a los ejes de los pliegues presentes en la zona. 71	71
Figura 47. Diagrama esquemático que ilustra la evolución de la cuenca ensiálica marginal del Complejo Quebradagrande-QGC. Tomado de Nivia et al, (2006).	72
Figura 48.a.) Reconstrucción paleogeográfica del Valanginiano y Maastrichtiano Tomado de (Moreno Sanchez & Pardo Trujillo, 2003)	74
Figura 49. Modelo Geológico Para la zona de estudio BLOQUE A.....	75
Figura 50. Modelo Geológico Para la zona de estudio BLOQUE B	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Perforaciones realizadas con la profundidad de las mismas	7
Tabla 2. Perfil de meteorización Deere y Patton (Deere & Patton, 1971)	10
Tabla 3. Índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1978).....	11
Tabla 4. Índice de la calidad de la roca (RQD), Deere <i>et al.</i> , (1970).....	12
Tabla 5. Clasificación de tobas encontradas en los sondeos.	34
Tabla 6. Patrones en familias de diaclasas principales en el área de estudio, tomado de (Pi Epsilon, 2021)	45
Tabla 7. Datos tomados en campo de estratificación en la zona de estudio tomado de (Pi Epsilon, 2021).....	45

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1.** Descripción secciones delgadas
- Anexo 2.** Columna estratigráfica PS-PR-OD-01
- Anexo 3.** Columna estratigráfica PS-PR-CM-01
- Anexo 4.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-01
- Anexo 5.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-02
- Anexo 6.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-03
- Anexo 7.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-04
- Anexo 8.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-05
- Anexo 9.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-06
- Anexo 10.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-07
- Anexo 11.** Columna estratigráfica PS-PR-CO-08

1. INTRODUCCIÓN

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) propone los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica. El EIA debe contener la caracterización del medio biótico y abiótico del área de influencia del proyecto, apoyado de información cualitativa y cuantitativa que permita conocer sus características. El medio abiótico incluye la caracterización geológica, la cual debe presentar toda la información recolectada en la exploración, como lo es la caracterización de rocas y depósitos, con su descripción macroscópica y microscópica, así como las columnas estratigráficas obtenidas en el estudio. Con el fin de unificar la información obtenida en la exploración se propone presentar un modelo geológico del área de estudio, el cual es la representación gráfica en tercera dimensión de las unidades geológicas in situ, teniendo en cuenta las variables como litología y geología estructural.

De acuerdo a lo anterior el presente trabajo se enfoca en la descripción litológica de las perforaciones realizadas, con el objetivo de correlacionar los niveles estratigráficos y proponer un modelo geológico para la zona de estudio ubicada en la Cordillera Central de Colombia, en el NW del departamento de Caldas (ver Figura 1). El sector en el que se están realizando las perforaciones forma un polígono con un área de 12,68 km². Mayores detalles respecto a la localización del proyecto no pueden ser presentados, debido a que se debe garantizar la confidencialidad del proyecto.

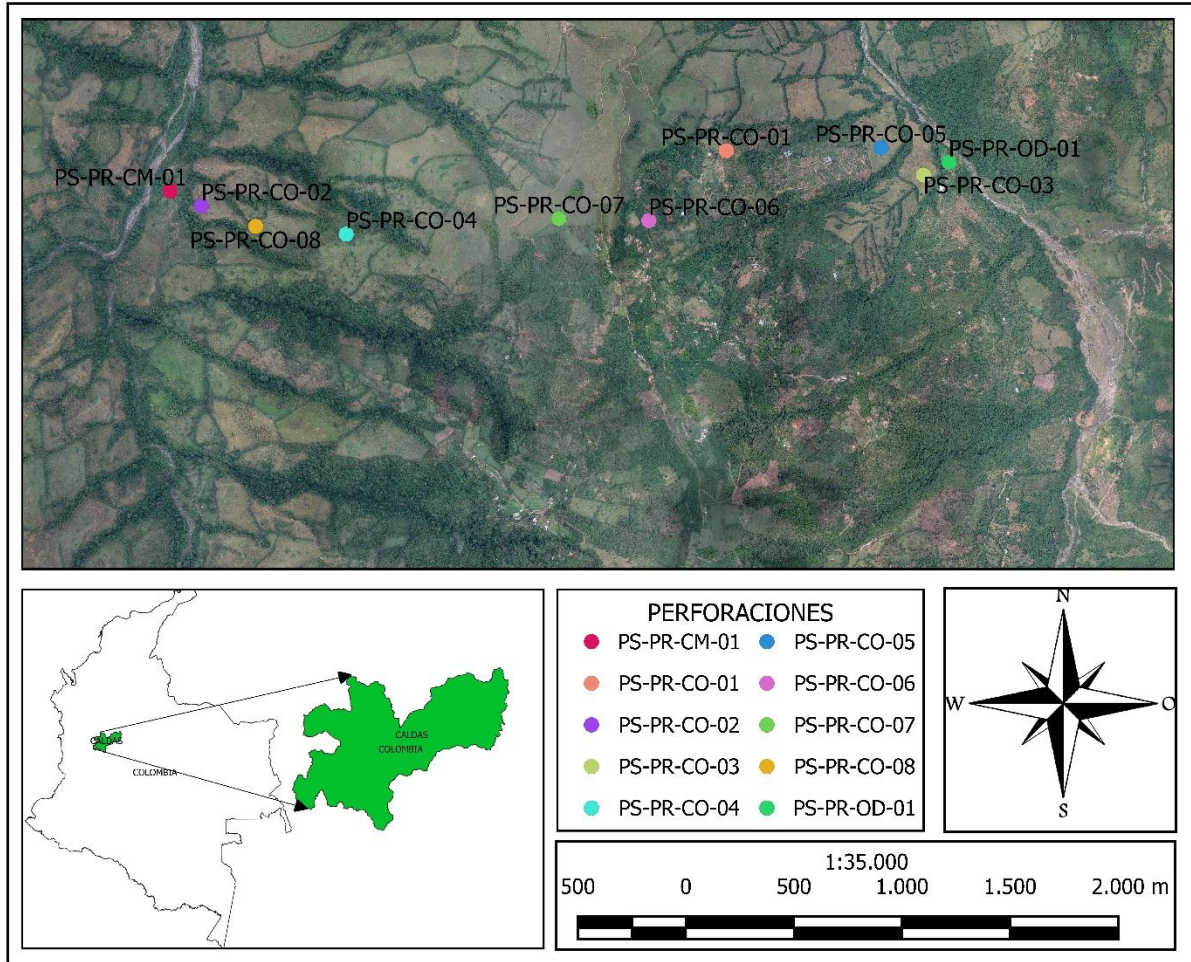


Figura 1. Ubicación del área de estudio. No se presentan coordenadas en la figura por la confidencialidad del proyecto.

Este trabajo está conformado por doce capítulos: el primer capítulo describe el contenido del documento y localiza espacialmente el área de estudio, el segundo capítulo muestra la justificación del estudio realizado y el porque es llevado a cabo en este sector; el tercer capítulo expone los objetivos a cumplir con la realización del estudio; el cuarto capítulo explica la metodología empleada para el desarrollo de las actividades, desde la recolección de información hasta su procesamiento; el quinto capítulo expone a partir de la revisión bibliográfica el contexto geológico de la configuración tectónica y unidades litológicas presentes, en las que se pueda

identificar su composición general, edad y relaciones espaciales con las unidades vecinas.; el sexto capítulo muestra los aspectos geológicos locales encontrados en las perforaciones y en la cartografía superficial, el séptimo capítulo muestra los resultados obtenidos en la campaña de exploración; el octavo capítulo presenta un análisis sobre los aspectos estructurales relevantes encontrados en las zona de estudio; El noveno capítulo se propone el modelo geológico y la historia evolutiva para la zona de estudio. Por último, en los capítulos diez y once se presentan las conclusiones y material bibliográfico referentes para este trabajo.

2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad Pi Épsilon Proyectos de Ingeniería Especializada S.A.S se encuentra realizando los estudios base de un proyecto hidroeléctrico de tipo captación lateral a filo de agua, para esto se tiene proyectado la construcción de un túnel de conducción a presión con una longitud aproximada de 3,67 km. En la fase de estudios base se obtendrá la información primaria relacionada con la topografía, la exploración geológica y geotécnica para los estudios de factibilidad y el Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

El túnel se diseñará teniendo en cuenta las condiciones geológicas, geomorfológicas y estructurales del macizo rocoso, buscando un trazado favorable para su lineamiento y una correcta localización para los portales y obras civiles. Para recolectar información sobre el macizo rocoso se realizó una campaña de exploración en la zona de estudio, que consta de 10 perforaciones a rotación con broca diamantina y recuperación de testigo (7 distribuidas a lo largo del trazo del túnel, 1 en obras de derivación, 1 en casa de máquinas y 1 en portal de salida siguiendo la alternativa de construcción), para definir un modelo geológico, con el cual realizar un diseño correcto de las obras subterráneas y establecer los tratamientos geotécnicos y estimación de los costos del túnel.

Con el fin de unificar la información recolectada en las perforaciones, se hace necesario realizar la construcción diagramas y perfiles estratigráficos que permitan extrapolar a lo largo del área de interés las unidades estratigráficas observadas y definidas en los sondeos, para así apreciar la geometría y relación espacial de las mismos, esto con el objetivo de correlacionar los niveles estratigráficos y proponer un modelo geológico de la zona.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo geológico para el área de estudio en el Complejo Quebradagrande a partir de las descripciones y columnas estratigráficas obtenidas desde perforaciones que se desarrollaron en la zona.

3.2 Objetivos específicos

- Describir los núcleos obtenidos en las perforaciones realizadas en la campaña de exploración.
- Elaborar columnas estratigráficas que permitan apreciar la geometría y relación espacial de los cuerpos.
- Correlacionar diferentes niveles estratigráficos a partir de las descripciones de los sondeos y las columnas estratigráficas.

4. METODOLOGÍA

Con el fin de conocer las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas, que se sitúan en el área de estudio del proyecto hidroeléctrico, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

4.1 Etapa I. Recopilación y revisión de la información

Esta etapa tuvo como objetivo realizar un reconocimiento y recopilación de información relacionada con el área de estudio, con el fin de tener la concepción de otros autores sobre las características geológicas (tectónicas y estratigráficas) de la zona que se trabajó. De igual manera se llevó a cabo una revisión de información relacionada con el tipo de proyecto y el proceso para la construcción de un modelo geológico.

4.2 Etapa II. Exploración del subsuelo

La campaña de exploración tuvo como propósito obtener información a profundidad del macizo rocoso, hacer una caracterización geológica y geotécnica del subsuelo, así como identificar las litologías encontradas y su distribución espacial. También se trazó como objetivo determinar características mecánicas y demás parámetros de resistencia de la roca, características requeridas en los diseños de las obras civiles del proyecto.

En esta etapa, se llevaron a cabo 8 perforaciones verticales en diámetro NQ (47,6 mm) con profundidades entre los 30,0 y 150,0 m, 1 perforación vertical en diámetro HQ (63,5 mm) con una profundidad de 240,0 m y 1 perforación inclinada en diámetro NQ con una profundidad de 60,0 m, para un total de 10 perforaciones a rotoperCUSión y 904,0 m perforados. En la Tabla 1 se relaciona cada perforación y profundidad correspondiente.

Tabla 1. Perforaciones realizadas con la profundidad de las mismas

Perforación	Profundidad (m)
PS-PR-CO-01	139,90
PS-PR-CO-02	50,80
PS-PR-CO-03	60,50
PS-PR-CO-04	230,00
PS-PR-CO-05	60,00
PS-PR-CO-06	110,00
PS-PR-CO-07	42,00
PS-PR-CO-08	150,00
PS-PR-OD-01	30,50
PS-PR-CM-01	30,00
Total profundidad	904,20

Las perforaciones PS-PR-CM-01 y PS-PR-OD-01 están localizadas en el sitio donde quedaría ubicada casa de máquinas y obras de derivación respectivamente, se determinó una profundidad de 30 metros para cada una con el objetivo de reconocer las características geomecánicas en esta localidad.

La perforación PS-PR-CO-02 tuvo como objetivo reconocer las características geomecánicas del macizo rocoso cerca al portal de salida del túnel, buscando un trazado favorable para su alineamiento y una correcta localización para los portales.

La perforación PS-PR-CO-05 planteada con el fin de interceptar una posible zona falla identificada como la falla Salamina Oeste, fue la única perforación orientada e inclinada con un azimut de 90° y un buzamiento de 70°.

Las perforaciones PS-PR-CO-01, PS-PR-CO-03, PS-PR-CO-04, PS-PR-CO-06, PS-PR-CO-07 Y PS-PR-CO-08, tienen el objetivo de caracterizar geológicamente la zona, se encuentran alineadas con el trazo del túnel.

La Figura 2 muestra las profundidades de las perforaciones con respecto a la conducción.

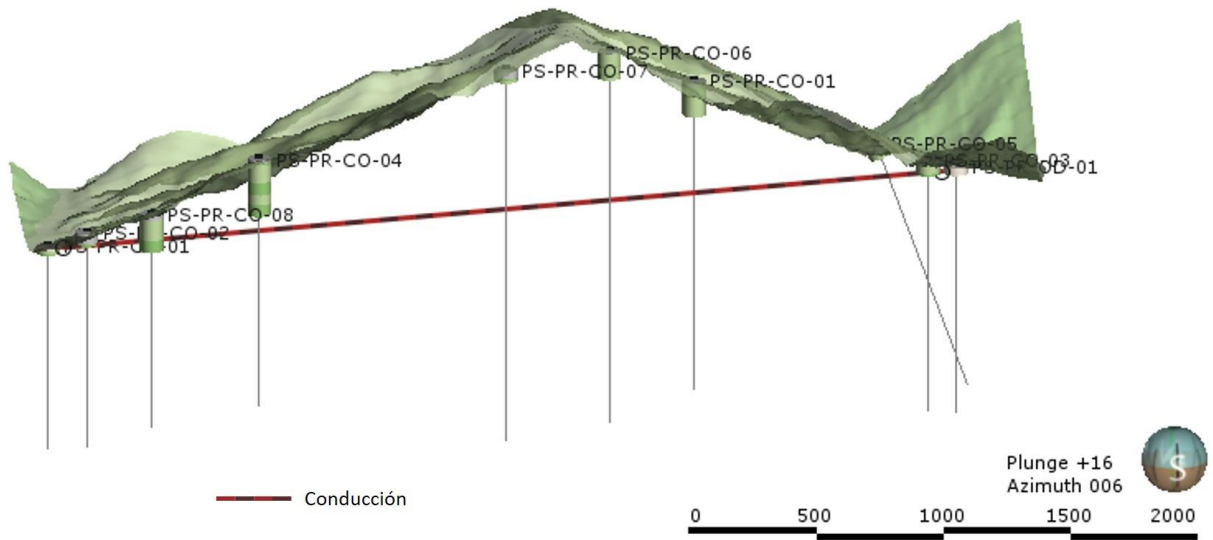


Figura 2. Perfil de la conducción con perforaciones asociadas. Tomado (Pi Epsilon, 2021)

El método de perforación utilizado fue perforación a rotación con broca diamantina y recuperación de testigo (Figura 3), la cual se basa en la combinación de dos acciones, rotación y empuje, a medida que avanza en profundidad, el equipo tiene en el interior de una tubería porta testigos que permite su recuperación. La tubería interior es independiente de la herramienta y puede extraerse mediante un cable.

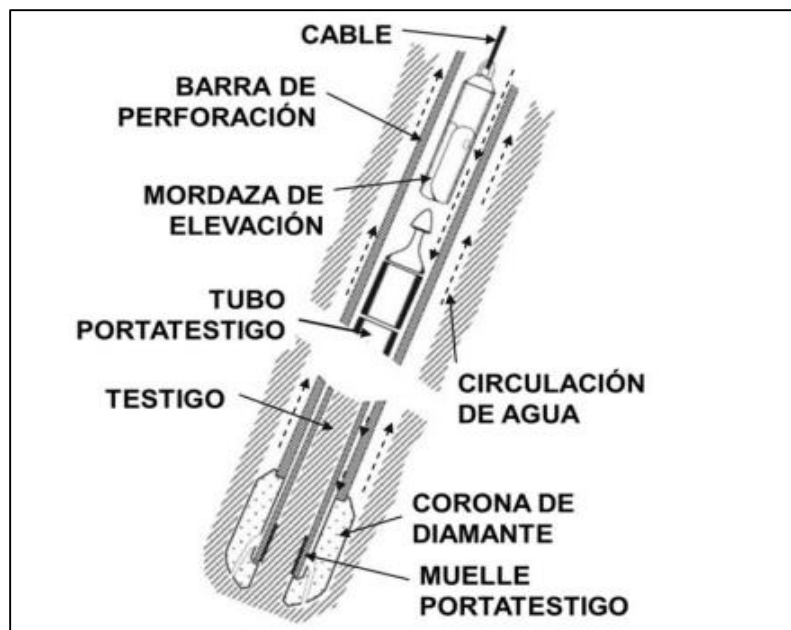


Figura 3. Esquema de perforación con corona de diamante (Marjoribanks, 2010)

Para cada uno de los sondeos llevó a cabo su respectiva descripción litológica, registro fotográfico, selección de muestras de suelo y/o roca para ensayos y el almacenamiento de las muestras en cajas de metal (porta-testigos) para su conservación. Las cajas porta-testigos fueron marcadas en la tapa con el nombre de la perforación, el número de caja y la profundidad de inicio y de final respectivamente. Al abrir la caja esta cuenta con tacos que marcan la profundidad de inicio de la caja, el avance de cada corrida y la profundidad final. Para la descripción de cada núcleo de roca se tuvo en cuenta características como la litología, estratificación, resistencia, horizonte de meteorización, diaclasas (Frecuencia, rugosidad, buzamiento) y RQD (%).

4.2.1 Litología

La revisión de las características litológicas se realizó de manera visual describiendo textura, color, composición, tamaño de grano y estructuras, para esto se utilizó una lupa con aumentos de 10x y 40x.

4.2.2 *Horizonte de Meteorización*

Para medir el grado de meteorización del cuerpo rocoso se empleó el perfil de meteorización (Tabla 2) propuesto por (Deere & Patton, 1971), el cual se divide en tres horizontes fundamentales suelo residual (I), roca meteorizada (II) y roca no meteorizada (III), como se muestra a continuación:

Tabla 2. Perfil de meteorización Deere y Patton (Deere & Patton, 1971)

Horizonte	Descripción
IA (Capa Vegetal)	Las capas superiores son ricas en materia orgánica. Todo el material rocoso ahora es suelo. Es un suelo sin características heredadas. Característicamente arcillo- limoso
IB	
IC (Saprolito)	El macizo rocoso está completamente descompuesto y la roca ahora está decolorada. Aun se aprecian estructuras (Discontinuidades) heredadas. Se encuentran fragmentos de entre 10% y 35% del volumen, pero fácilmente desmenuzables. Hay escasos núcleos de roca, pero es posible encontrarlos.
IIA (Transición de saprolito a roca)	El macizo rocoso esta decolorado y altamente alterado. Más del 50% del material rocoso está descompuesto o desintegrado. Las discontinuidades pueden estar oxidadas o abiertas. Bloques de roca.
IIB (Roca parcialmente meteorizada)	Macizo rocoso está débilmente decolorado. Las discontinuidades pueden estar abiertas y oxidadas. La roca es dura y resistente a excavaciones.
III (Roca Intacta)	El macizo rocoso no da signos visibles de meteorización. Las discontinuidades pueden eventualmente presentar oxidación y decoloración pero en un grado

4.2.3 Resistencia

Para la estimación de la resistencia del macizo rocoso se seleccionaron algunas muestras y fueron enviadas al laboratorio para realizar ensayos de carga puntual, de igual manera se realizó una estimación *in situ* empleando los índices manuales de resistencia de roca (Tabla 3) en campo propuestos por International Society for Rock Mechanics Commission on testing methods (ISRM) (1978).

Tabla 3. Índice manual de resistencia de roca en campo (ISRM, 1978).

Clase	Descripción	Identificación del campo	Valor aprox. de la RCS (Mpa)
S ₁	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0.025
S ₂	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0.025 – 0.005
S ₃	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para penetrar el dedo	0.05 – 0.1
S ₄	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo	0.1 – 0.25
S ₅	Arcilla muy regida	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0.25 – 0.5
S ₆	Arcilla dura	Se marca con dificultad al marcar con la uña	> 0.5
R ₀	Roca Extremadamente	Se puede marcar con la uña	0.25 – 1.0
R ₁	Roca muy blanda	Deleznable bajo golpes del martillo de geólogo, puede rayar se con una navaja. Se talla fácil mente con una navaja	1.0 – 5.0
R ₂	Roca blanda	Puede rayarse con dificultad con la navaja, se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente con la punta del martillo	5.0 – 25

R ₃	Roca moderadamente dura	No se puede rayar con una navaja la muestra en mano, se puede romper con un golpe firme del martillo de geólogo, al impacto la punta del martillo indenta hasta 5 mm	25 – 50
R ₄	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romperla muestra, especímenes sostenidos en la mano se rompe con un simple golpe de martillo	50 – 100
R ₅	Roca muy dura	Se necesita muchos golpes con el martillo de geólogo para romperla muestra.	100 – 250
R ₆	Roca extremadamente dura	El martillo produce solamente descarrillado de la muestra, sonido metálico de golpe. Solo saltan esquirlas de roca.	> 250

4.2.4 RQD

Para definir el índice RQD% se utiliza la ecuación (1). A partir del índice RQD, se puede clasificar la masa de la roca como se indica en la Tabla 4

$$RQD\% = \frac{\sum \text{fragmentos} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total de la corrida}} \times 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Tabla 4. Índice de la calidad de la roca (RQD), Deere *et al.*, (1970)

RQD %	Calidad de roca
< 25 %	Muy Mala
25 – 50%	Mala
50 – 75%	Regular
75% - 90%	Buena
90% - 100%	Muy buena

4.3 Etapa III. Análisis e interpretación de la información

En esta etapa se hizo la revisión de la información recolectada en campo y se realizó su interpretación. Inicialmente se clasificó la litología encontrada, para la clasificación de las rocas sedimentarias detríticas se usaron los triángulos de clasificación de pettijohn et al. (1987), para las rocas volcanoclásticas se empleó el triángulo de clasificación de Schmid (1981) y para las rocas ígneas el Diagrama de clasificación QAPF de (Streckeisen, A., 1976),

Luego de tener la descripción de la litología completa, se procedió a establecer su relación con las unidades estratigráficas presentes en el área de estudio y realizar las columnas estratigráficas. Se hizo una correlación de la litología encontrada en los sondeos con respecto a la geología superficial, para esto se utilizaron los datos estructurales tomados y se procedió a construir algunos perfiles estratigráficos.

A partir de las litologías encontradas en los sondeos, se hizo necesario realizar 6 Secciones delgadas para análisis petrográfico y así complementar la información litológica del área de estudio.

4.4 Etapa IV. Modelamiento de datos

En esta fase se emplearon los programas CorelDRAW Graphics Suite 2021 y AutoCAD 2020 de la empresa AUTODESK y se procedió a diseñar las columnas estratigráficas, cortes, bloques diagrama y modelo geológico para la zona de estudio.

Las columnas estratigráficas se realizaron en CorelDRAW bajo licencia académica en escala de trabajo 1:200, 1:300 y 1:400, dependiendo la profundidad de los sondeos, donde se

graficaron los cambios litológicos en cada sondeo, con espesor, profundidad, estructuras sedimentarias internas reconocidas.

Posteriormente se realizaron 3 cortes geológicos con orientación W-E en escala de trabajo en AUTOCAD bajo licencia corporativa, donde se pudo integrar la información recolectada de las perforaciones y cartografía superficial realizada por la empresa en el 2017. Para esta etapa se tomaron los datos de estratificación (buzamiento real) y se transformaron a buzamiento aparente para poder ser graficados.

Por último, a partir de los cortes realizados, se realizaron 2 bloques diagrama en los que se pudo correlacionar los cortes realizados y representar las litologías y planos de falla existentes.

5. MARCO GEOLÓGICO

5.1 Antecedentes

En la zona de estudio y sus alrededores no se han hecho trabajos similares de exploración del subsuelo que involucren perforaciones en las unidades litológicas, la mayoría de trabajos se han centrado en hacer cartografía en superficie como se presenta a continuación.

- Uno de los primeros trabajos es realizado por González (1980), donde se presenta la cartografía geológica correspondiente a las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina).
- Años más tarde González (1993) propone un corte geológico generalizado W – E de la cordillera central y occidental esquematizando las unidades y fallas presentes en la zona a la latitud 5° 25'N. Donde se puede identificar el Sistema de Fallas Romeral Limitado al W por la Falla Piedecuesta y al E por la Falla San Jerónimo (Figura 4).
- Posteriormente se propone un perfil de reconocimiento a través del Complejo Quebradagrande entre la Falla Romeral y la Falla Salamina (Figura 5), donde se expone una secuencia de rocas sedimentarias como lutitas, limolitas, grauvacas con algunos niveles de rocas volcánicas (Álvares, 1995).

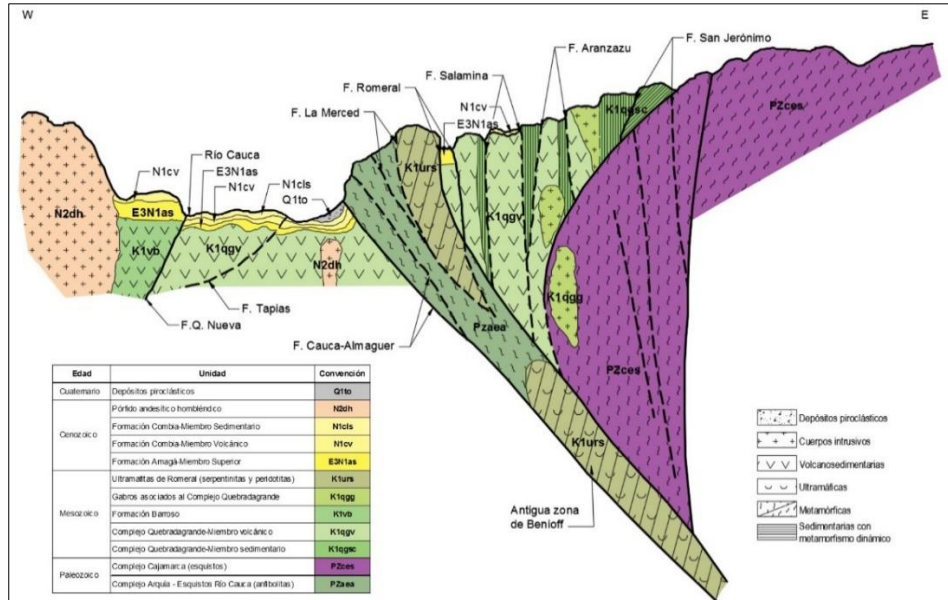


Figura 4. Corte geológico esquemático entre las cordilleras central y Occidental a 5° 25' N. modificado de (González, 1993)

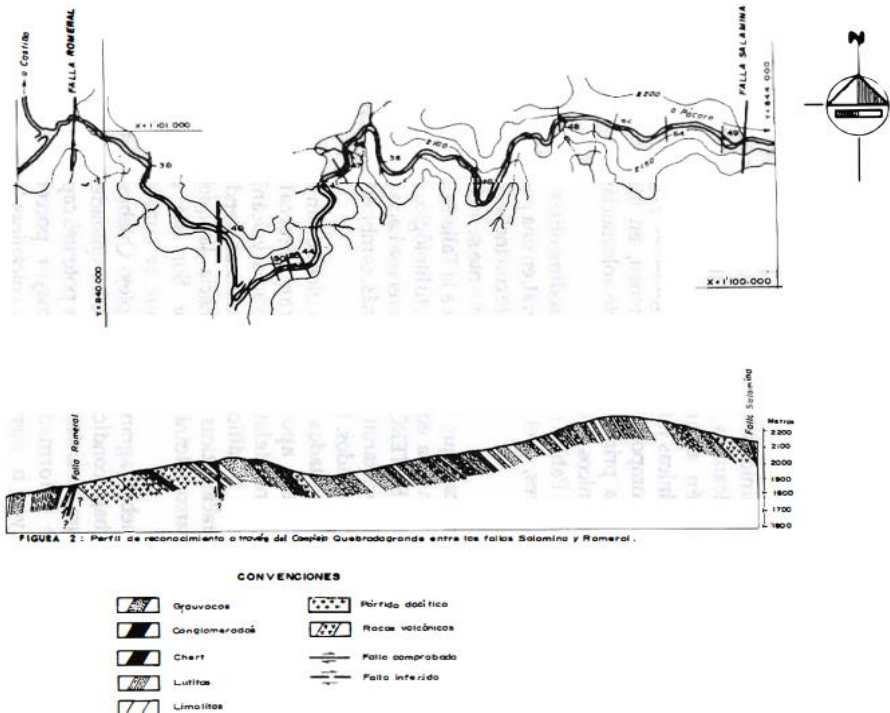


Figura 5. Perfil de reconocimiento a través del Complejo Quebradagrande entre las fallas Salamina y Romeral tomado de (Álvares, 1995)

- Años más tarde se presentó la cartografía geológica, caracterización y cálculo de reservas en un área de concesión en la quebrada Maiba, este trabajo se encuentra situado al suroeste de la zona de estudio; en su cartografía superficial se encontró la Formación Amagá y la Formación Combia (Beltrán & Correa, 2015).
- Posterior a este trabajo, se desarrolló un mapa geológico en escala 1:25000 para el municipio de Salamina Caldas, este permitió mostrar la distribución, relación y composición de los materiales de la tierra, tales como rocas y depósitos superficiales, entre ellos deslizamientos de tierra, con base en el tipo de roca encontrado, se definió para la zona de estudio una sola unidad geológica conocida como el Complejo Quebradagrande observándose en algunos sectores altamente fracturada y levemente alterada (Quintero & Velez, 2016).

5.2 Geología regional

A nivel regional se presentan grandes rasgos litológicos y tectónicos en el flanco occidental de la Cordillera Central colombiana, estos rasgos se caracterizan por la presencia de rocas sedimentarias (areniscas, lutitas, chert intercalado con niveles de tobas), ígneas (gabros y basaltos) y la existencia de fallas regionales como es el Sistema Romeral y algunos lineamientos y fallas satélites que generan deformación en la zona. A continuación, se describen las unidades litológicas que componen el área de estudio de la más antigua a la más reciente (Figura 6). Cabe mencionar que la simbología de las unidades empleada tanto para los colores, así como por la nomenclatura formal de cada unidad, sigue los lineamientos establecidos por la Comisión Internacional de Estratigrafía (2013) (Gómez *et al.* (2015)).

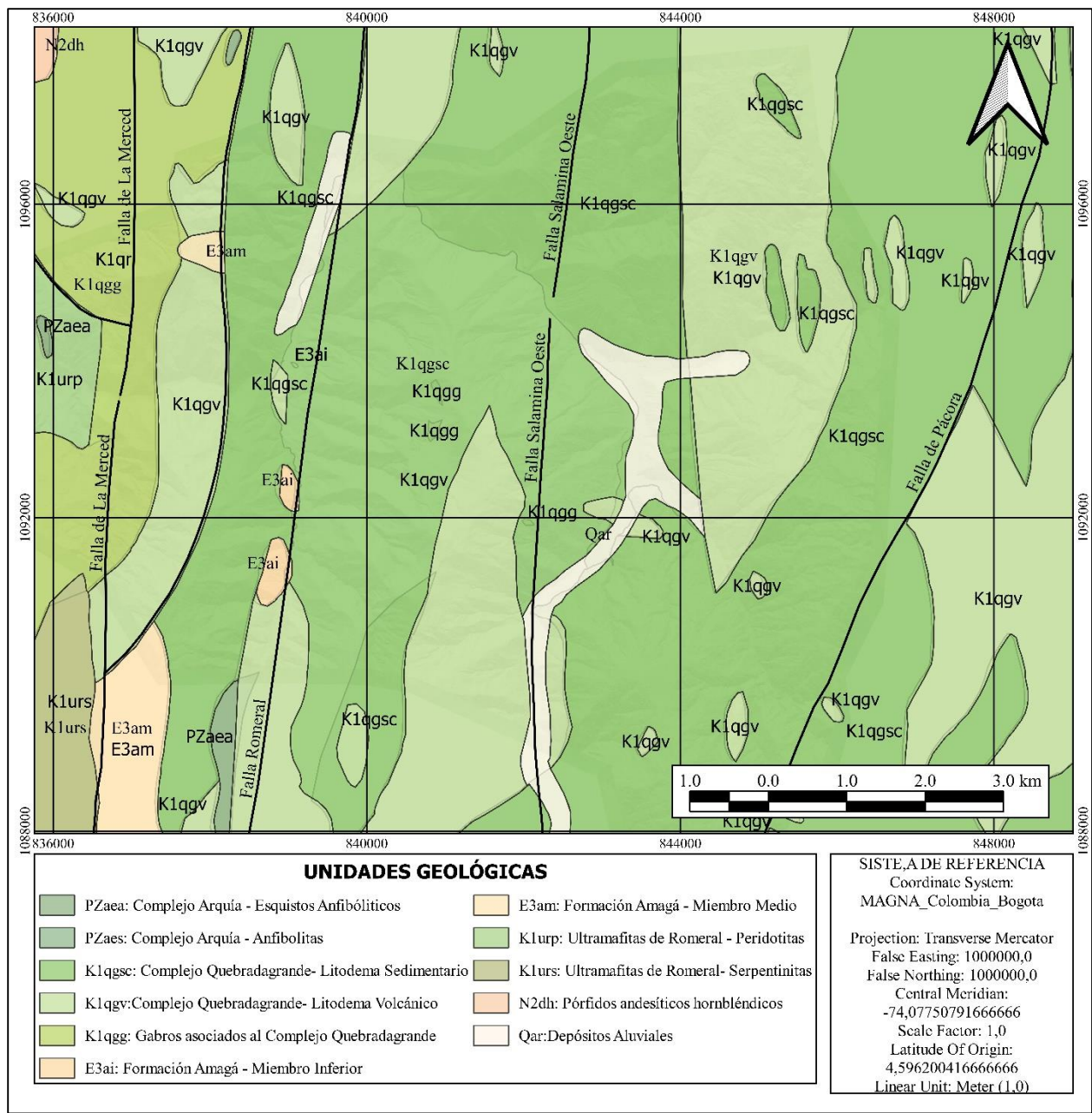


Figura 6. Geología regional de la zona de estudio. Modificado de González et al. (1980).

5.2.1 Estratigrafía

Complejo Arquía (PZaea, PZaes)

El termino Arquía fue empleado para designar las rocas expuestas en el río Arquía, límites entre Antioquia y Caldas, esquistos cuarzo seticíticos, esquistos anfibólitos y anfibolitas granatíferas (Toussaint & Restrepo, 1974), posteriormente se propone formalmente el nombre de Complejo Arquía para designar un conjunto conformada por rocas metamórficas de origen ígneo y sedimentario localizadas al occidente del Complejo Quebradagrande (Maya & González, 1995)

Esta unidad se encuentra aflorando como una franja alargada, estrecha y discontinua de esquistos anfibólitos y sericíticos, cuarcitas y neises, junto a anfibolitas y metagabros asociados a cuerpos ultramáficos, localizado entre las fallas Cauca Almaguer y Silvia Pijao (Arango & Rodríguez, 2013). Se ha dividido en tres unidades: Arquía sin diferenciar (PZa), Esquistos Anfibólitos del Cauca (PZaea y PZaes) y Esquistos de Lisboa – Palestina (PZaanch), de las cuales los esquistos Anfibólitos del Cauca son los únicos presentes en el área de estudio.

El Complejo Arquía se divide en dos intervalos de edad: 100 a 113 Ma que corresponde a datos radiométricos obtenidos mediante el método K/Ar, que coinciden con el inicio del Arco Barroso - Sabanalarga que afectó la zona de sutura y las dos cortezas, indicando un evento térmico al que estuvo sometido posterior al metamorfismo y 203 a 229 Ma que se obtuvieron por el método Ar-Ar y se interpretan como la posible edad de metamorfismo, la cual concuerda con la edad de metamorfismo del Complejo Cajamarca, que es el basamento de la Cordillera Central de Colombia (Arango & Rodríguez, 2013).

Complejo Quebradagrande ((K1qgsc, K1qgv)

Definida inicialmente por Grosse (1926) como un conjunto de derrames volcánicos formados por porfiritas diabásicas, porfiritas augíticas, basaltos con plagioclasas y tobas, intercalados en las secciones extrusivas con sedimentos marinos. Posteriormente Botero (1963) le asigna el nombre de Formación Quebradagrande y González (1980) separa la unidad en dos miembros, uno sedimentario (K1qgsc) y otro volcánico (K1qgv). Álvares (1995) prefiere cambiar la jerarquía de la unidad de formación a grupo debido a las fuertes variaciones estratigráficas que presenta. Por último, Maya & González (1995) proponen el termino Complejo Quebradagrande compuesto por litodemas.

El litodema Sedimentario (K1qgsc) hacia el este de la Falla Romeral está formado un conjunto de rocas delgadamente estratificadas de color gris verdoso a negro, compuesto por grauwacas silíceas, lutitas y menores cantidades de chert y calizas además de conglomerados volcánicos de guijarros y gránulos con aporte volcanoclástico. Al oeste de la falla se presenta una variación litológica encontrando lutitas silíceas y arenitas feldespáticas interestratificadas (Álvares, 1995).

El litodema Volcánico (K1qgv) está conformado por lavas basálticas principalmente, y cantidades menores de andesitas y piroclastitas, los cuales están intercalados con sedimentitas marinas poco profundas con aporte volcanogénico, estos cuerpos se encuentran deformados, en mayor o menor grado (Álvares, 1995).

El Complejo Quebradagrande se presenta como una franja alargada y discontinua en el flanco oeste de la Cordillera Central, con afloramientos desde el oriente de Pasto y Popayán al Sur, hasta inmediaciones de Santa Fe de Antioquia al Norte, donde se acuña con rocas metamórficas

del Complejo Cajamarca y Complejo Arquía y cuyos límites tectónicos corresponden a la Falla San Jerónimo al oriente, y la Falla Silvia-Pijao al occidente (Maya & González, 1995).

Los sedimentos intercalados con las rocas volcánicas contienen fósiles cuya edad varía entre el Aptiano-Albiano (Maya & González, 1995) y radiométricamente se han obtenido edades desde el Cretácico Inferior, que podrían interpretarse como la edad magmática, hasta el Cretácico Superior, marcando un evento metamórfico de muy bajo grado (Álvares, 1995).

Gabros asociados al Complejo Quebradagrande (K1qgg)

Se adopta el nombre de Gabros asociados al Complejo Quebradagrande dado por la Unión Temporal DUNIA-ATG (2005) con el objeto de separarlos de los Gabros de Romeral por su posición geológica y geográfica diferente, restringida en este caso al Complejo Quebradagrande y su ubicación estructural al Este del Sistema de Fallas de Romeral.

González (1980) reporta en el área de las planchas 167 Sonsón y 187 Salamina, la presencia de gabros dentro de cinco conjuntos diferenciados en el área, los cuales conforman un cuerpo irregular de gabros. La mayor parte de los cuerpos de gabro, localmente metagabros, están relacionados a rocas volcánicas espilitizadas y a peridotitas serpentinizadas, formando parte del Complejo Ofiolítico del Cauca a lo largo de la zona de Falla de Romeral, la cual ha producido intensos efectos dinámicos en la mayoría de ellos.

Aunque no se tiene ninguna edad radiométrica para muestras de gabro localizadas en esta área, éstos se han correlacionado con el Gabro de Pueblito, asociado también a peridotitas y dioritas piroxénicas consideradas por (Toussaint & Restrepo, 1974) como parte del Complejo Ofiolítico del Cauca y el cual registró una edad de 126 ± 12 Ma., Cretácico Inferior.

Ultramafitas de Romeral (K1urp, K1urs)

González (1980) con base en el grado de serpentinización y presencia o ausencia de ortopiroxeno, divide el conjunto de rocas ultramáficas en harzburgitas, peridotitas con algo de olivino conservado y serpentinitas provenientes de dunitas y peridotitas. Posteriormente la Unión Temporal Dunia-ATG (2005) nombra como Ultramafitas de Romeral al conjunto de cuerpos discontinuos de rocas ultramáficas asociados a gabros y relacionados a la zona tectónica de Romeral.

Los cuerpos alargados de peridotita-gabro y peridotita relacionados al Sistema de Fallas de Romeral conforman un cinturón denominado como “Cinturón Ofiolítico de Romeral”, la mayoría de estos cuerpos se encuentran asociados a rocas diabásicas espilitizadas y /o a gabros, formando el Complejo Ofiolítico del Cauca (Unión Temporal Dunia-ATG, 2005).

En general la unidad consta de serpentinitas foliadas de color gris a verde, compuestas esencialmente por minerales del grupo de la serpentina y trazas de magnetita-cromita, mostrando localmente vestigios texturales de la roca original. Se presentan con frecuencia intensamente fracturadas y plegadas (1980)

La faja de Ultramafitas de Romeral (K1ur) se encuentra en contacto fallado al norte con el Complejo Arquía; en el sector occidental al oriente del Río Cauca, se encuentra en contacto fallado con la Formación Combia es intruida por un cuerpo de pórfidos dacíticos. Al oriente se encuentra en contacto fallado con el Complejo Quebradagrande, internamente (faja ofiolítica) se encuentra en contacto fallado y al parecer neto, con las rocas de la unidad Gabros de Romeral (Unión Temporal Dunia-ATG, 2005).

No se tienen reportadas edades radiométricas para muestras de gabros localizados en esta área, sin embargo, estas ultramafitas de romeral se han correlacionado con muestras de los gabros de Pueblito en Heliconia (González H. , 1980), unidad que ha sido datada radiométricamente por el método K/Ar en hornblenda en rangos de $163,0 \pm 10,0$ Ma a $131,0 \pm 9,0$ Ma (Toussaint, Evolución geológica de Colombia, Cretácico, 1996), lo que la ubica en el intervalo Jurásico a Cretácico Inferior.

Formación Amagá (E3ai, E3am)

Grosse (1926) describe las rocas localizadas entre la Cordillera Central y la Cordillera Occidental como un conjunto de rocas siliciclásticas intercaladas con mantos de carbón y nombra la unidad como Terciario Carbonífero de Antioquia. Por otro lado, González (1980) nombra estas rocas como la Formación Amagá y las divide en 3 miembros a partir de su litología:

El Miembro inferior (E3ai) es un nivel rico en conglomerados polimícticos con cantos de rocas metamórficas y dioritas, niveles de areniscas conglomeráticas de color crema a blanco en las cuales el tamaño del grano se va haciendo más fino hacia la parte superior y algunas capas de arcillolita arenosa intercaladas con los niveles de areniscas (González H. , 1980).

El Miembro medio (E3am) se caracteriza por la presencia de mantos de carbón de espesor variable y la ausencia de niveles conglomeráticos. Es un miembro compuesto por mantos de carbón, areniscas y arcillolitas con laminación fina, las areniscas varían de grano grueso a fino con cemento silíceo-arcilloso, mientras las arcillolitas varían de tonalidad grisácea a verdosa, algunos niveles contienen concreciones de siderita y ocasionalmente se presentan capas delgadas de color negro, interestratificadas con los mantos do carbón (González H. , 1980).

La edad de la Formación Amagá fue establecida por Van der Hammen (1960 en: (González H. , 1980)) como del Oligoceno superior, a partir del estudio de palinomorfos encontrados en la formación; la parte más alta del miembro superior corresponde al Mioceno inferior (Van der Hammen, 1957).

Rocas hipoabisales porfiríticas (pórfidos andesíticos/dacíticos, N2dh/N2d)

Son cuerpos de rocas porfiríticas, de composición variable entre andesita y dacita, constituyen formas sobresalientes en la parte oeste de las planchas 167 y 187. (Calle & González, 1982) en el área delimitaron dos facies: una dacítica (N2d) y otra andesítica (N2dh), que a veces entre sí presentan contactos gradacionales y al meteorizarse dan origen a suelos de color gris claro amarillentos, los cuales conservan cristales bipiramidales inalterados de cuarzo cuando provienen de la facies dacíticas. Los pórfidos están constituidos por fenocristales, menores de 1 cm, de plagioclasa, cuarzo y en ocasiones un ferromagnesiano cloritizado en una matriz felsítica, se presentan deformados y algunas veces desarrollan foliación cataclástica, especialmente notable en cuerpos pequeños (González H. , 1980).

Las edades radiométricas obtenidas en cuerpos andesíticos similares a los expuestos en el área de estudio, arrojan un rango entre 6,0 Ma a 8,0 Ma (Mioceno Superior), los pórfidos dacíticos, por su relación espacial interna con los andesíticos, se consideran de una edad similar (González H. , 2001).

Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios se encuentran en el área a lo largo de los principales ríos y quebradas, formando terrazas respecto al nivel actual de las corrientes y en la base de laderas con fuertes pendientes, en las márgenes de los afluentes principales. Se caracterizan por ser depósitos

inconsolidados, pobremente seleccionados, con constituyentes heterogéneos desde el punto de vista composicional, textural y granulométrico. Existe también material coluvial, pero por su ocurrencia muy local y poca extensión no se separan de los depósitos aluviales (Qar).

Depósitos Aluviales (Qar): Los sedimentos que rellenan los valles del río Cauca y la parte baja de muchos ríos y quebradas en el área, constituyen el Cuaternario más reciente, escasamente disectado, formando amplias llanuras. Generalmente se trata de llanuras producidas por repetidas inundaciones y en algunos casos por flujos de lodo posiblemente relacionados a rápidos deshielos (González, 1993).

5.2.2 Geología Estructural

El límite geográfico definido por el río Cauca no coincide con el límite geológico entre las cordilleras Central y Occidental, las diferencias geológicas entre ambas cordilleras son fundamentales, la Central representa un dominio de basamento continental polimetamórfico de baja presión y en gran parte Paleozoico (Complejo Cajamarca), mientras la Occidental es esencialmente de rocas de ambiente oceánico de edad Cretácica. Este límite es complejo y está marcado por el Sistema de Fallas Romeral, especialmente por su expresión más occidental (Falla Cauca-Almaguer); los complejos ofiolíticos representativos de material oceánico y las rocas metamórficas de media-alta presión del Complejo Arquía se encuentran cabalgando sobre el basamento metamórfico de la Cordillera Central (González, 1993)

La Cordillera Central se ha caracterizado por ser una cadena montañosa que se ha visto afectada por intensos plegamientos, fallamientos, levantamientos e intrusiones batolíticas de gran magnitud durante los distintos episodios orogénicos, que oscurecen las relaciones estratigráficas y estructurales originales (Calvache *et al.*, (2013)). Las grandes fracturas en general, tienen una clara

expresión geomorfológica (Romeral, La Merced, Aránzazu y Salamina) y presentan rocas fracturadas, trituradas y cizalladas, con alteración y brechamiento, mientras que las menores sólo presentan algunas de estas características y están marcadas principalmente por lineamientos fotogeológicos (González, 1993).

Sistemas de Fallas de Romeral

Se extiende desde Ecuador al sur y divide los Andes Colombianos en dos principales dominios (el Occidental y el Oriental), se prolonga al norte de Colombia hasta el departamento de Córdoba y se caracteriza por presentar una mezcla estructural de diversas litologías con un estilo tectónico común y que han sido afectadas por eventos magmáticos. Se encuentra limitado al este, por el flanco occidental de la Cordillera Central, constituida por rocas predominantemente del Paleozoico y el Mesozoico y al oeste por el flanco oriental de la Cordillera Occidental; constituida por rocas del Mesozoico al Cenozoico (Unión Temporal Dunia-ATG, 2005). Ha sido interpretado en varios trabajos como una zona de deformación tectónica que marca el límite entre corteza continental hacia el oriente y corteza oceánica acrecionada por varios eventos de subducción y obducción contra el margen continental al occidente.

El Sistema de Fallas de Romeral está compuesto por un conjunto de fallas paralelas a subparalelas que en algunos casos se entrecruzan, presentan una dirección generalizada N-S a NNW-SSE (González H. , 1980) se refiere con este nombre al conjunto de fracturas que se encuentra entre las fallas de San Jerónimo y de Sabanalarga e incluye las fallas de San Jerónimo, Minas, Romeral, Piedecuesta, Amagá, La Cascajosa, Cauca - Almaguer y las Fallas Sabanalarga al norte y Salamina y La Merced al sur.

Falla de San Jerónimo:

Es descrita por Grosse (1926) como una falla inversa con buzamiento hacia el este y con grandes desplazamientos verticales, por González (1980) como una falla de rumbo por su longitud y por su continuidad, y por La Unión Temporal Dunia-ATG (2005) como una falla de alto ángulo por su trazo recto y continuo. Se encuentra en su parte norte afectando sedimentos continentales del Terciario (Oligoceno Tardío), en el sur se encuentra cubierta por tobas y cenizas volcánicas recientes, donde es conocida con el nombre de Falla de Aránzazu-Manizales (González H. , 1980).

Falla de La Merced (Falla Silvia – Pijao)

Presenta un trazo continuo de 29,0 km con dirección aproximada N-S, pone en contacto rocas básicas con el Litodema Volcánico del Complejo Quebradagrande. Definida en el área de Salamina y correlacionada por Maya & González (1995) con la Falla Silvia – Pijao, constituyendo según estos autores el límite oriental del Complejo Arquía. De igual manera Moreno-Sánchez *et al.*, (2016) sugieren un comportamiento dextral inverso para esta estructura al analizar indicadores cinemáticos entre los municipios de Manizales y Villamaria Caldas.

Falla de Romeral

En este informe se utiliza el término de "Falla Romeral" en el sentido de Grosse (1926). Kammer (1993) explica que la utilización indiscriminada de los términos Falla de Romeral y Sistema de Fallas de Romeral sin criterios claros de correlación han generado confusión en la literatura. Se define en la plancha geológica de Caldas y se extiende en el área de estudio con un trazo continuo dirección N20°W en la parte norte hasta el lineamiento de Arma (Unión Temporal

Dunia-ATG, 2005). Se encuentra afectando rocas del Complejo Quebradagrande poniéndolas en contacto entre sí.

Falla de Salamina

Presenta su trazo continuo y se extiende hacia el norte con dirección aproximada N-S a lo largo de 40 Km hasta unirse con la Falla Silvia- Pijao. Se puede considerar como una imbricación del bloque colgante de la Falla Silvia- Pijao, la foliación en rocas del Complejo Quebradagrande, así como el intenso fracturamiento en rocas ultramáficas son efectos que comprueban el trazo de la estructura en el área (Unión Temporal Dunia-ATG, 2005).

Falla Cauca-Almaguer

Marca el límite occidental del Complejo Arquía y el de las rocas con metamorfismo dinamo-térmico en los Andes del norte, es conocida en algunos trabajos como Zona de Falla Romeral (Maya & González, 1995), en la región presenta una expresión reducida hacia el extremo norte, al estar generalmente cubierta por las rocas de las Formaciones Combia y Amagá.

6. GEOLOGÍA LOCAL

6.1 Unidades litológicas

En el área de estudio se encuentran aflorando litodémicas del Complejo Quebradagrande y rocas máficas asociadas, unidades más recientes como la Formación Amaga y diferentes tipos de depósitos cuaternarios, coluviales y aluviales. El Complejo Quebradagrande se encuentra limitado entre sí por estructuras pertenecientes al Sistema de fallas Romeral con tendencia de rumbo al NNE, este sistema genera en algunos sectores foliación milonítica y milonitas en franjas estrechas no cartografiables, evidenciando zonas de cizalla dúctil. Así mismo, se presenta en la zona evidencia de deformación frágil-dúctil indicada por la presencia de alto diaclasamiento y pliegues. A continuación, se describen las unidades litológicas que componen el área de estudio de la más antigua a la más reciente:

6.1.1 Complejo Quebradagrande (K1qgsc, K1qgv)

Es la unidad con mayor extensión en la zona de estudio, se pueden encontrar exposiciones de esta unidad sobre la vía principal, en los desvíos a las veredas La Pedrera-La Y, la carretera La Y-Guayabal y a lo largo de las paredes rocosas que se exhiben en las quebradas cercanas a casa de máquinas y obras de derivación. El Complejo Quebradagrande es cubierto discordantemente al SW de la zona por las rocas de la Formación Amaga.

La composición principal de la unidad está dada por secuencias métricas a decimétricas de rocas volcanoclásticas (tobas de cristales, tobas líticas, tobas laminadas) y rocas sedimentarias (limolitas, lodolitas, areniscas), mostrando una estratificación con tendencia general de rumbo al NE-NW y buzamientos hacia el SE y NW donde varía su ángulo desde los 30° hasta 90°.

Las limolitas se presentan con laminación paralela y de tonalidad gris oscuro a negro, sin embargo, por su grado de meteorización puede variar a tonalidades crema (Figura 7). Se encuentran niveles ricos en materia orgánica siendo untuosas al tacto, denominándose como limolitas carbonosas, en algunos sectores, estas rocas presentan evidencia de deformación frágil por la presencia de una mayor densidad en el fracturamiento.



Figura 7. Secuencia de rocas sedimentarias intensamente fracturadas.

Hacia el sector de casa de máquinas, se encuentran limolitas estratificadas con lodolitas de disposición N32/60NE, las limolitas se presentan laminadas, homogéneas, de color gris oscuro-negro (N2 N1), con venas rellenas por carbonatos dispuestas de manera irregular con intercalaciones métricas–centimétricas de lodolitas compactas no laminadas, de color uniforme gris oscuro-claro (N3) con lustre sedoso (Figura 8).



Figura 8. Afloramiento de limolitas en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2.

Así mismo, en las perforaciones PS-PR-CO-01, PS-PR-CO-02, PS-PR-CO-03, PS-PR-CO-04, PS-PR-CO-06, PS-PR-CO-07, PS-PR-CO-08 Y PS-PR-CM-01 se encontraron niveles de roca compacta, de tamaño de grano limo, de tonalidad gris medio – claro (N5), la cuales presentan ocasionalmente laminas paralelas y gruesas de color gris oscuro (N2); en sectores se pueden observar con lustre sedoso, poca dureza y con alta presencia de materia orgánica, esta última determinada por la mancha negra que deja al tacto. Localmente se pueden encontrar niveles con buena selección, donde se observan estructuras augen y microvenillas paralelas a la laminación, plegadas y rellenas con cuarzo (Figura 9).

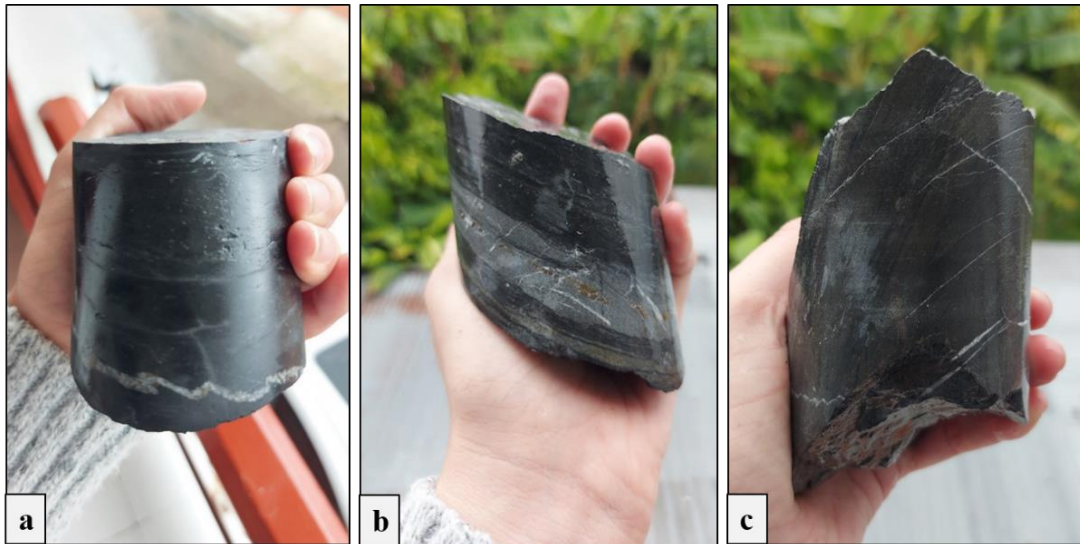


Figura 9. *Limolitas encontradas en las perforaciones.* a) Limolita con la presencia de venillas de cuarzo plegadas. b) Limolita intercalada con nivel de toba de cristales. c) Limolitas con presencia de microvenillas.

En los recorridos no se encontraron capas de areniscas, sin embargo, en la perforación PS-PR-CO-02 y PS-PR-CO-08 hacia la zona de descarga, se encontraron niveles de roca clástica con fragmentos no orientados de distribución uniforme mal seleccionados, tamaño máximo 22 mm, color gris medio claro (N5), ocasionalmente líticos de Limolita subredondeados y de cuarzo lechoso dando una apariencia moteada, clasificada en sección delgada como grauvaca (Figura 10).



Figura 10. *Grauvaca encontrada en perforación PS-PR-CO-02*




En afloramiento se han encontrado rocas de grano medio con textura moteada dada por la presencia de cristales subhedrales de cuarzo y plagioclasa y fragmentos de roca sedimentaria, posiblemente Limolita, estos embebidos en una matriz de grano fino de tonalidad gris oscuro (N2); adicionalmente se encuentran afectadas por deformación dúctil, presentado orientación y elongación en los cristales. Estas muestras fueron clasificadas en sección delgada como una Toba de cristales, en donde se describió la matriz como un material amorfo compuesto por ceniza muy fina de composición félsica.




Figura 11. Afloramiento de toba de cristales diaclasados, en horizonte de meteorización IIB y resistencia R3, sector obras de derivación.

En cada uno de los sondeos realizados, se encontraron niveles de tobas, las cuales se describen en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de tobas encontradas en los sondeos.

Litología	Descripción	Fotografía
<i>Toba lítica</i>	Roca de tonalidad gris verdoso, compuesta por fragmentos de hasta 5 cm, posiblemente de basalto y pómez, en una matriz de tonalidad gris claro (N5) ceniza, Se pueden observar en las fracturas planos de oxidación. Esta litología fue encontrada solo en dos niveles de la perforación PS-PR-CO-06 con una resistencia de R2 y horizonte de meteorización IIA.	
<i>Toba de cristales</i>	Roca maciza de tonalidad gris verdoso, cristales de tamaño fino compuestos de cuarzo y plagioclasas, estos cristales se encuentran en una matriz de tonalidad gris oscuro (N1-N2) de grano muy fino. Esta litología fue descrita en las perforaciones PS-PR-CO-01y PS-PR-CO-06.	
<i>Toba de cristales</i>	Roca de apariencia moteada, cristales de tamaño medio a fino compuestos de cuarzo, plagioclasas, feldespato y en menor proporción fragmentos de rocas sedimentarias, estos cristales se encuentran en una matriz de tonalidad gris oscuro (N1-N2) de grano muy fino. Se evidencia cierta elongación y tendencia de los cristales que sigue la laminación presente en los sondeos. Esta litología es la más frecuente en la zona de estudio y fue descrita en las perforaciones PS-PR-CO-01, PS-PR-CO-02, PS-PR-CO-03, PS-PR-CO-04, PS-PR-CO-06 y PS-PR-CO-08.	

Litología	Descripción	Fotografía
<i>Toba laminada</i>	Roca de grano fino a medio, con laminación plana paralela, las láminas presentan distintas tonalidades, unas gris medio-oscuro (N4) y otras gris medio-claro (N5), con la presencia de fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Así mismo, cortando la laminación se pueden observar venas blancas plegadas. Fue descrita en las perforaciones PS-PR-CO-01, PS-PR-CO-03, PS-PR-CO-04, PS-PR-CO-06 y PS-PR-CO-08.	

Se pudo apreciar en algunos sectores deformación dúctil, evidenciado por la presencia de protomilonitas, descritas como rocas piroclásticas con laminación irregular marcado por cambios en la coloración de gris oscuro-negro (N2-N1) a gris medio claro (N4), con orientación de los lentes y cristales, ocasionales venillas plegadas y deformadas, con micro augen dispersas, en conjunto con orientación (ver Figura 12) . Esta litología fue descrita en la perforación PS-PR-CO-01, PS-PR-CO-04, PS-PR-CO-05 y PS-PR-CO-06.



Figura 12. Protomilonitas encontradas en las perforaciones.

Por último, se encontró hacia el sector de casa de máquinas en la perforación PS-PR-CM-01 niveles de basaltos de tonalidad gris verdoso a gris oscuro, con variaciones texturales presentándose desde afaníticos hasta porfiríticos con matriz criptocristalina oscura y fenocristales de plagioclasas y piroxenos subhedrales.

Es de resaltar, que de las litologías anteriormente mostradas, fueron seleccionadas 6 muestras para análisis petrográfico, análisis que fue realizado por el profesor Humberto González (Anexo 1).

Dadas las características y asociaciones litológicas observadas, estas rocas hacen parte del Litodema Volcánico del Complejo Quebradagrande, el cuál ha sido descrito por González (1996, en Buenaventura *et al.*, 2004) como un conjunto constituido por espilitas, diabasas, basaltos y rocas piroclásticas con intercalaciones de cherts, areniscas lodosas líticas, arenitas feldespáticas y limolitas

6.1.2 Gabros Asociados al Complejo Quebradagrande (K1qgg)

Se encuentran en la zona de estudio como cuerpos discontinuos y dispersos formando bloques. Los gabros están compuestos por plagioclasa, piroxenos y menor proporción hornblenda, de color verde oscuro a gris medio, con textura hipidiomórfica granular a subofítica, masivos a débilmente foliados, ocasionalmente se observan cristales orientados. Estos gabros se caracterizan por encontrarse intensamente meteorizados

6.1.3 Formación Amagá- miembro Inferior

Esta unidad es de poca ocurrencia en la zona de estudio, aflora como lentes de sedimentos, suprayaciendo discordantemente las rocas del Complejo Quebradagrande. Los sedimentos de esta unidad están formados por areniscas de tamaño de grano medio a fino, compuestas por clastos de

cuarzo y líticos subredondeados, en una matriz silico-arcillosa con la presencia de cemento ferruginoso, en muestra de mano se observa de color pardo rojizo, sin embargo, a escala de afloramiento cambia a una tonalidad gris-verdosa (Quintero & Restrepo, 2009).

6.1.4 Depósitos de vertiente (Q2v)

Son depósitos no consolidados formados en las laderas por fragmentos de roca propiciados por procesos de remoción en masa, en las partes medias y bajas de las vertientes. Están constituidos por material transportado por la gravedad, bloques y gravas en una matriz de tamaño fino.

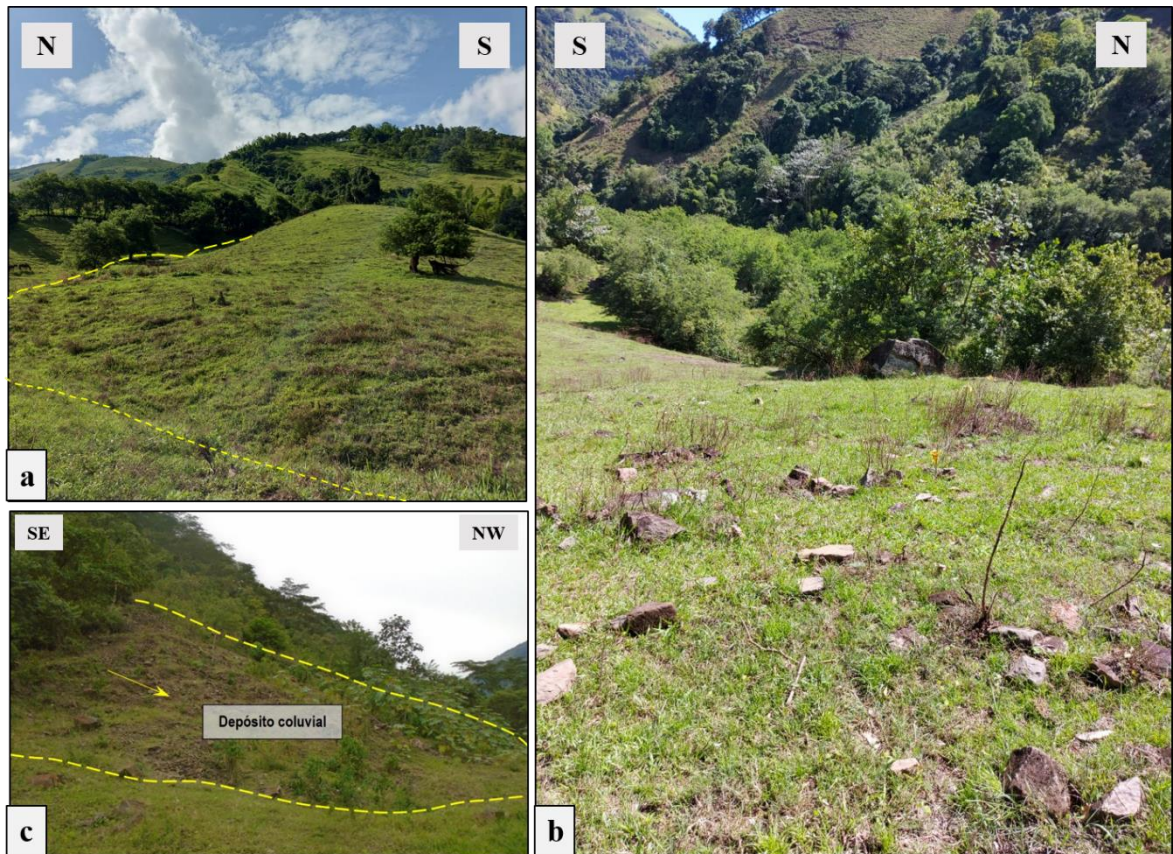


Figura 13. Depósitos de vertientes en la zona de estudio. a). Morfología generada por depósitos de vertiente en las laderas hacia la parte oeste del área de influencia. b). Depósito de vertiente en la parte alta de la ladera c). Depósito de vertiente identificado asociado a proceso erosivo presentado en la parte baja de la ladera.

Para la zona de estudio se presentan desde escalas pequeñas a grandes con extensiones laterales extensas a angostas y longitudes largas a cortas (Figura 13); en general son de tipo matriz soportado, mal seleccionados, con relación fragmentos/matriz de 45%/65%, presentan clastos tamaño grava a bloque, angulares a subredondeados, con baja esfericidad, compuesta por fragmentos de tobas, limolitas y basaltos meteorizados, embebidos en una matriz limo-arcillosa, normalmente de tonalidad amarillo ocre a pardo.

6.1.5 Depósitos Aluviales (*Qal*)

Corresponden a depósitos no consolidados, que rellenan los valles del río y demás quebradas importantes en la zona de estudio, formando amplias llanuras de inundación y terrazas aluviales. Este tipo de depósitos se encuentran ampliamente a lo largo del cauce del río Pozo y algunas quebradas con la capacidad de transportar sedimentos y depositarlos a orillas de las mismas.

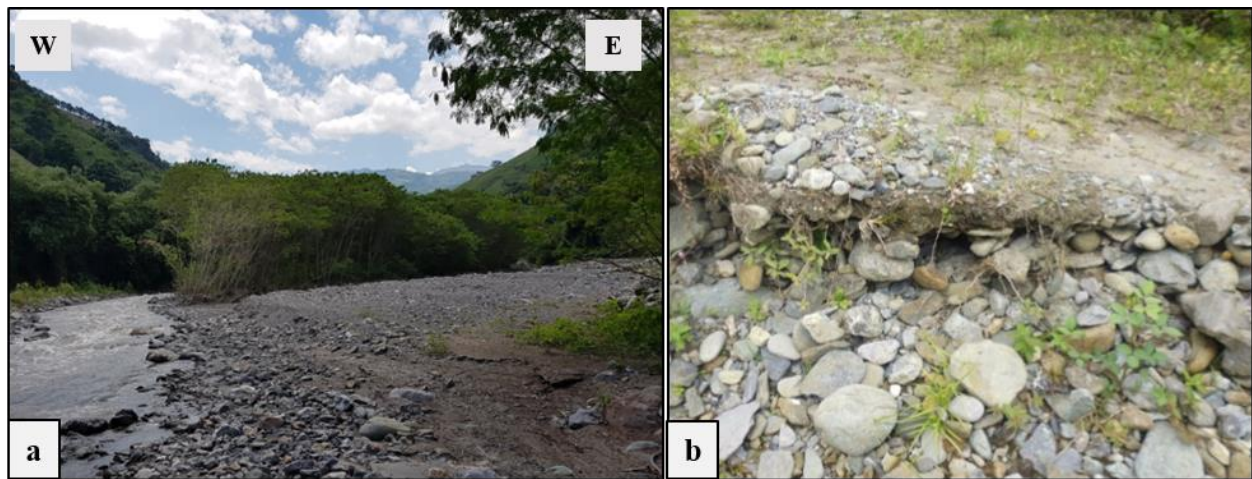


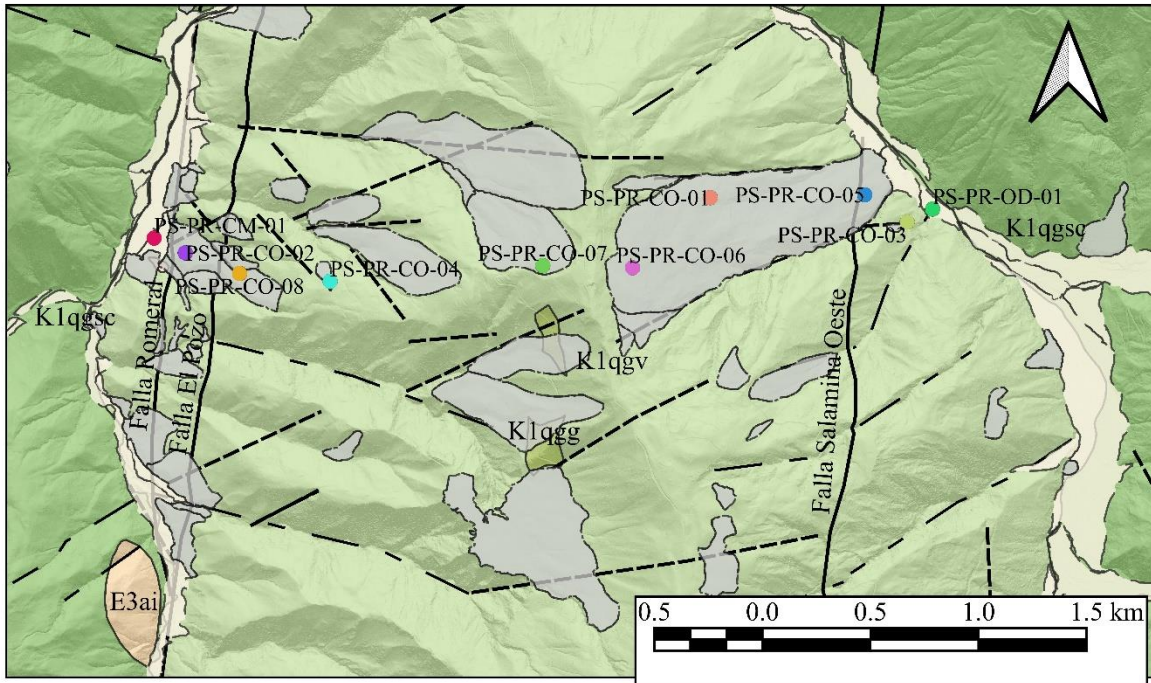
Figura 14. Depósito Aluvial asociado al río Pozo. a) Sedimentos expuestos en la dinámica fluvial actual del río Pozo. b). Material que conforma terraza aluvial del río Pozo.

Se encuentran constituidos por bloques, gravas, arenas y limos, embebidos en una matriz areno-arcillosa (Figura 14), con variaciones de clasto soportados a matriz soportados, con clastos angulares a sub-angulares de baja esfericidad, mala selección y cuya composición está dada por basaltos, andesitas, gabros, aglomerados, peridotitas, brechas, basaltos, andesitas, entre otros embebidos una matriz areno-arcillosa.

En la Figura 15 se presentan las unidades cartografiadas, estructuras geológicas y rasgos estructurales de la zona de estudio, teniendo como base la geología de la plancha 187 Salamina a escala 1:100.000 (González *et al.*, 1980) y ajustada de acuerdo a la interpretación de fotos aéreas a diferentes escalas, análisis de imágenes de *Google Earth*®, recorridos de campo y los resultados de la exploración del subsuelo.

6.2 Geología Estructural

De acuerdo al contexto geológico, la zona de estudio se encuentra dentro del Sistema de Fallas de Romeral, donde las unidades asociadas se presentan como cuerpos elongados con dirección S-N, paralela a las estructuras. La zona de falla principal y las fallas satélites, son reconocibles por la presencia indicadores geomorfológicos como: cambios de pendiente, silletas y hombreras de falla, lomos de obturación, facetas triangulares, drenajes alineados, valles rectilíneos y cicatrices de deslizamientos.























CONVENCIONES	
Unidades Geológicas	
	K1qgsc: Complejo Quebradagrande - Litodema Sedimentario
	K1qgv: Complejo Quebradagrande - Litodema Volcánico
	K1qgg: Gabros asociados al Complejo Quebradagrande
	E3ai: Formación Amaga - Miembro Inferior
	Q2v: Depósito de vertiente
	Qal: Depósito aluvial
Fallas	
	Falla Cubierta
	Falla definida
	Falla inferida
	Lineamiento
Perforaciones	
	PS-PR-CM-01
	PS-PR-CO-01
	PS-PR-CO-02
	PS-PR-CO-03
	PS-PR-CO-04
	PS-PR-CO-05
	PS-PR-CO-06
	PS-PR-CO-07
	PS-PR-CO-08
	PS-PR-OD-01

Figura 15. Geología Local de la zona de estudio

6.2.1 Fallas

Falla Romeral

Se localizada al oeste de la zona de estudio, se ha reportado con un comportamiento dextralateral, con dirección N-S y buzamiento 70°SE a subvertical (Pi Epsilon, 2021). Ejerce un control en el río principal y afecta las rocas del Complejo Quebradagrande. Entre las expresiones geomorfológicas de esta estructura de encuentran facetas triangulares, lomos, hombreras y silletas de falla, lomos deflectados, lineamiento de corrientes, cauces controlados, valles rectilíneos y movimientos en masa de gran magnitud alineados a lo largo de la traza (Figura 16 y Figura 17).

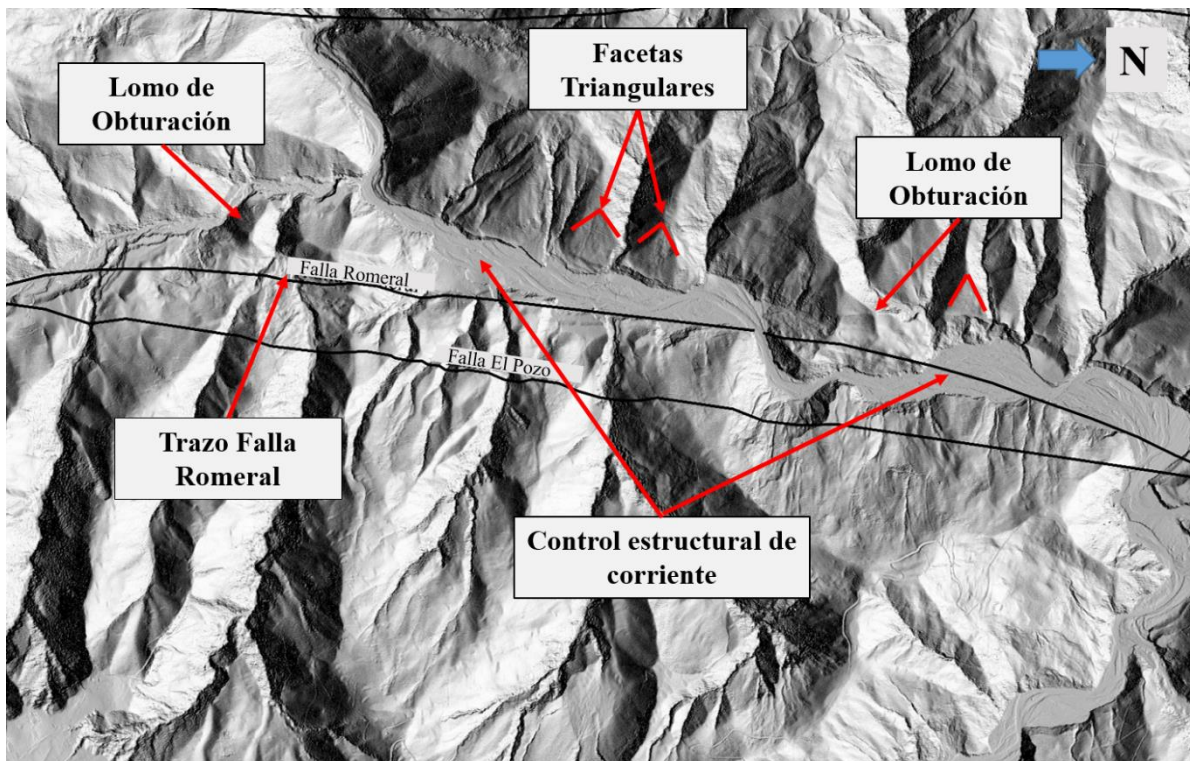


Figura 16. Rasgos geomorfológicos identificado en mapa de sombras (Hillshade) de la zona de estudio.

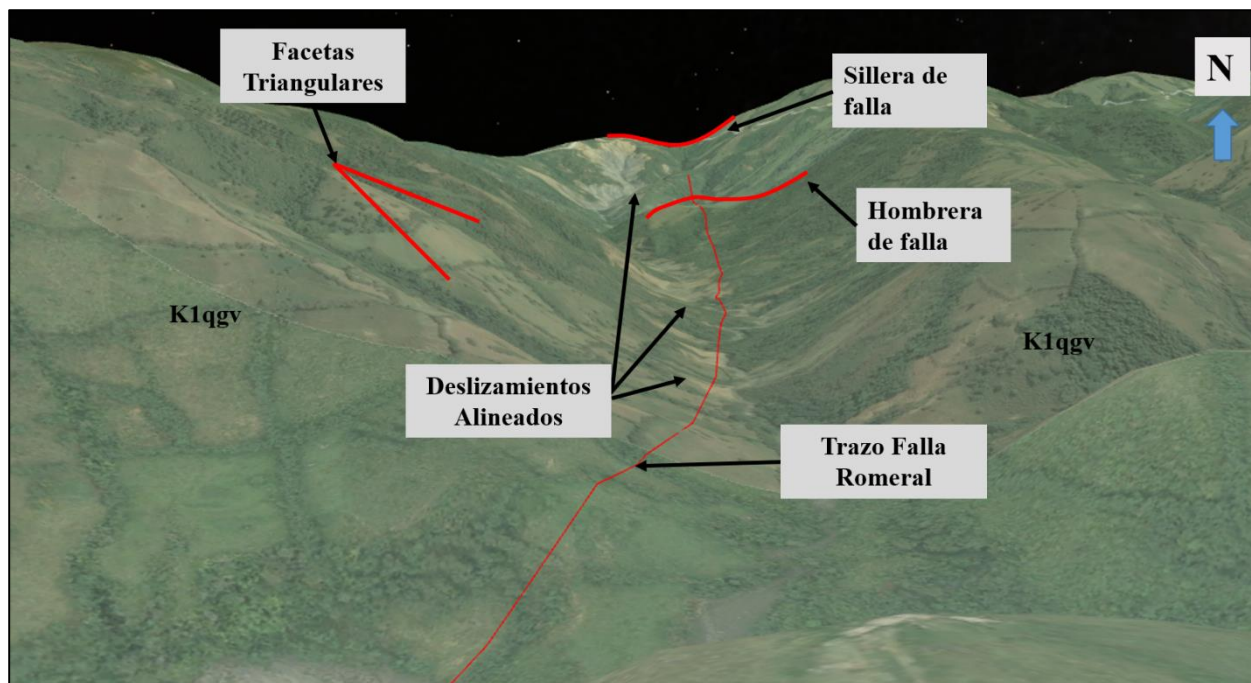


Figura 17. Rasgos geomorfológicos del trazado de la Falla de Romeral, tomado de google earth.

Falla Salamina Oeste

Esta estructura cruza al este de la zona de estudio en sentido S-N, controlando cierto tramo del río Chamberí. Para el área de trabajo se evidencia a nivel de afloramiento una zona de cizalla donde se determinó un buzamiento de 65°SW , allí se observan intercalaciones de rocas volcanoclásticas y sedimentarias intensamente fracturadas (PI EPSILON, 2018). Entre las expresiones geomorfológicas encontradas, se tienen facetas triangulares, hombreras de falla, drenajes deflectados y alineados (Figura 18).

Para la verificación de esta zona de falla se realizó la perforación PS-PR-CO-05, en la cual se encontraron rocas altamente fracturadas asociadas a protomilonitas. Así mismo en la perforación PS-PR-CO-03, la cual se desarrolló cercana a la zona de falla se encontraron niveles

de limolitas carbonosas, mostrando en algunos tramos ocasionales venillas plegadas y deformadas, con micro augen dispersas en conjunto con débil orientación.

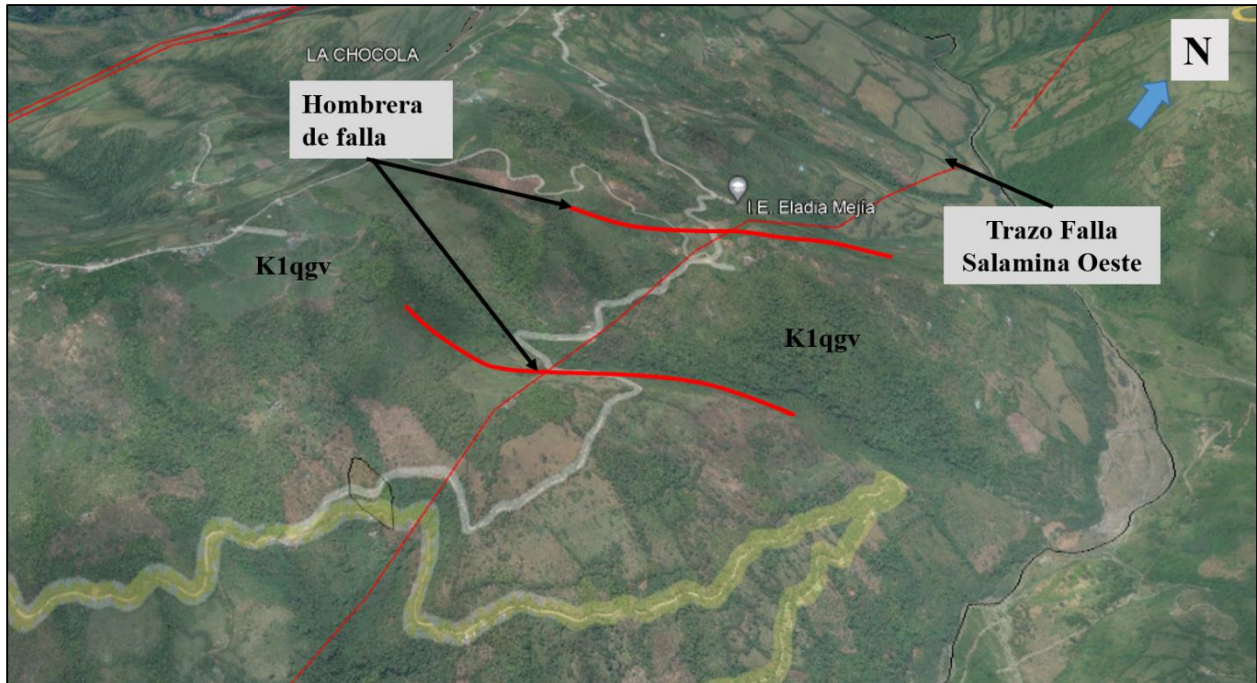


Figura 18. Rasgos geomorfológicos en el trazo de la falla Salamina Oeste, tomada de google earth.

Fallas menores

A nivel de afloramiento durante recorridos de campo, por parte Pi-Épsilon en el año 2017 y 2020, se identificaron fallas de carácter local, las cuales coinciden con la dirección de las estructuras regionales. Estas cizallas varían en el tramo de afectación a las rocas.

Entre estas se tiene una falla de carácter local, trazada a partir de características geomorfológicas (Figura 19) y resultados de la geofísica que sugieren una componente de rumbo dextral; se presenta en la zona paralela a la Falla Romeral y ha sido nombrada informalmente como Falla El Pozo, dado que su traza controla el cauce del río del mismo nombre.

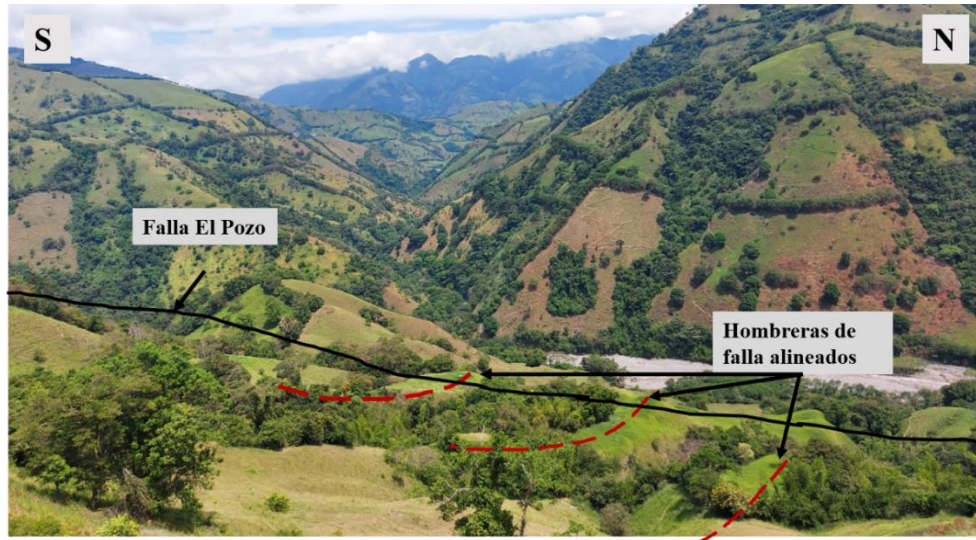


Figura 19. Proyección del Trazo de la Falla el Pozo en la zona de estudio, donde se encuentran hombreras de falla Alineadas.

6.2.2 Diaclasas

Las unidades litológicas del área de estudio presentan un intenso diaclasamiento. Según campañas de campo realizadas por Pi Epsilon en los años 2017 y 2020, fue posible identificar varios planos de diaclasas, los cuales fueron llevados a diagramas de rosas (Figura 20), donde se pudo reconocer 3 familias de diaclasas con tendencia preferencial y disposición aproximadamente perpendicular como se indica en la Tabla 6).

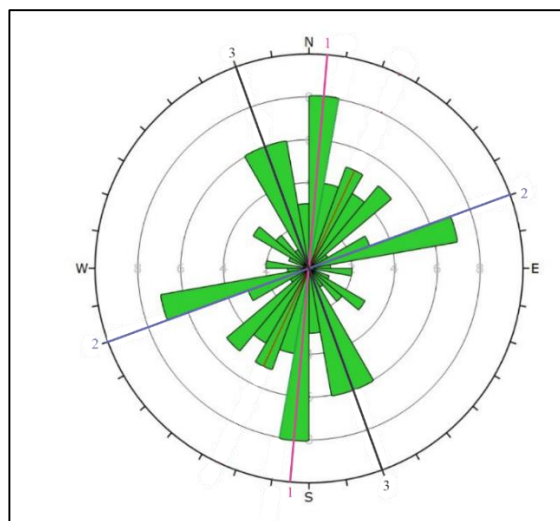


Figura 20. Diagrama de rosas asociado a diaclasas en la zona de estudio, Tomado de (Pi Epsilon, 2021)

Tabla 6. Patrones en familias de diaclasas principales en el área de estudio, tomado de (Pi Epsilon, 2021)

	Rumbo/Buzamiento	Dip/Dip Direction	Observaciones
1	N5°E/65°NW	65°/275°	Familias que representa la dirección con mayor grado de ocurrencia.
2	N70°E/75°SE	75°/160°	
3	N20°W/75°NE	75°/70°	Familia con gran ocurrencia en la zona, perpendicular a la familia 2

En los sondeos las discontinuidades están moderadamente juntas, con persistencia alta, se mantienen cerradas sin presencia de agua, la roca a lado y lado se encuentra moderadamente meteorizada, con presencia de óxidos de hierro en los planos, y rugosidades escalonadas, planares a onduladas. en ocasiones se identifica arcillas, cuarzo o carbonatos relleno las aberturas.

6.2.3 Estratificación

En relación a campañas de campo realizadas por Pi Epsilon en los años 2017 y 2020, se obtuvieron en los recorridos diferentes datos estructurales (Tabla 7), donde se pudo identificar que las rocas aflorantes en el área de estudio presentan orientaciones preferenciales (N40°W/40°NE, y N40°E/30°NW). Las diferencias en rumbo y sentidos de buzamiento indican que las mismas se encuentran plegadas tanto en rumbo como en buzamiento.

Tabla 7. Datos tomados en campo de estratificación en la zona de estudio tomado de (Pi Epsilon, 2021)

RUMBO	BUZAMIENTO	RUMBO	BUZAMIENTO
N40E	90	N-S	40E
N45E	60NW	N20W	40SW
N10E	70NW	N15W	25NE
N35E	25NW	N15W	20NE
N20E	30NW	N20E	40NW
N25E	25NW	N30W	25NE
NS	65E	N15W	20NE
N80W	65SW	N20E	40NW

7. EXPLORACION DEL SUBSUELO

Para la zona de estudio se ejecutaron 10 perforaciones diamantinas, programadas teniendo en cuenta la caracterización geológica realizada en los trabajos de campo adelantados por Pi Epsilon, con el objetivo de determinar litologías presentes en el túnel, horizontes de meteorización, presencia de agua, posible existencia de zonas de falla, contactos litológicos, etc. A continuación, en la Figura 21 se muestra un perfil mostrando la distribución de las perforaciones a profundidad.

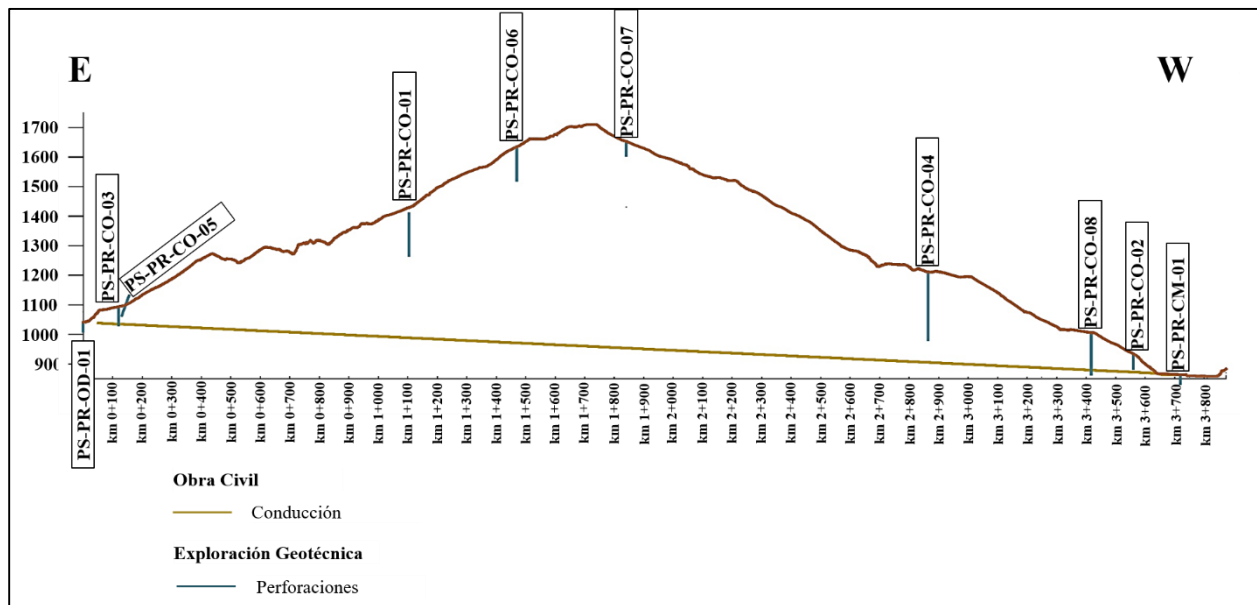


Figura 21. Localización en vista de perfil de las perforaciones ejecutadas., tomada de (Pi Epsilon, 2021).

7.1 Perforaciones

7.1.1 PS-PR-OD-01

La perforación fue realizada a 35,0 metros del río principal en el margen izquierdo sobre un depósito aluvial (Figura 22). Este sondeo se hizo en diámetro NQ (47,6 mm) y se alcanzó una profundidad de 30,50 m. Se encontró el nivel de agua en promedio a los 4,0 metros.



Figura 22. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-OD-01. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción litológica

Toda la perforación está representada por un depósito aluvial matriz soportado (Figura 23), localmente clasto-soportado, mal seleccionados conformado en su mayoría por arenas de grano medio y color gris oscuro sin consolidar con clastos de arenisca subredondeados de hasta 25,0 cm de diámetro. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 2.



Figura 23. Perforación PS-PR-OD-01. a) Depósito Aluvial clasto soportado, Caja #2. b) Depósito Aluvial clasto soportado, Caja #6

7.1.2 PS-PR-CM-01

Este sondeo se ubica al margen izquierdo del río principal en una terraza aluvial con altura de 5,0 m respecto al nivel actual del río (Figura 24). Este sondeo se hizo en diámetro NQ y se alcanzó una profundidad de 30,0 metros. El nivel freático medido durante los últimos días de la perforación fue de 5,6 m.

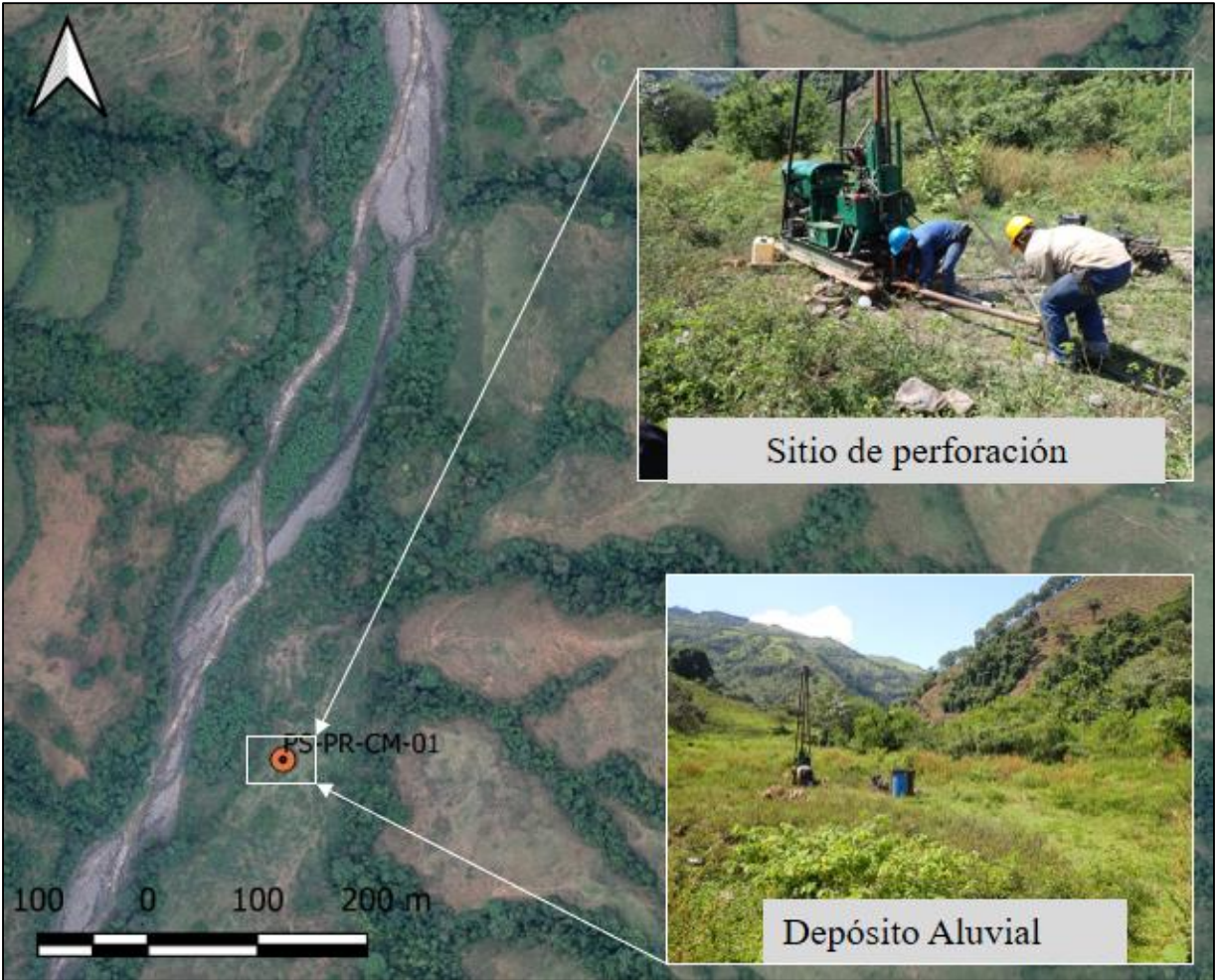


Figura 24. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CM-01. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción litológica:

Inicialmente se encontró un depósito aluvial de 12,00 m de espesor clastosoportado y localmente matriz soportado, seguido por un nivel de basaltos con un espesor de 12,70 m, en horizonte de meteorización IIA-IIB con resistencia entre R2-R3. Por último, una unidad litológica tipo limolita de 5,30 m de espesor, en horizonte de meteorización IIB y resistencia R3 alcanzándose una profundidad total de 30,00 m. Los RQD son bajos a nulos en la Limolita carbonosa, mientras que en los basaltos presentan un mayor porcentaje de recuperación. La Figura

25 muestra las diferentes litologías encontradas en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 3.



Figura 25. Perforación PS-PR-CM-01. a) Depósito aluvial clasto soportado, caja #1. b) Basalto en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2, caja #4

7.1.3 PS-PR-CO-01

La perforación alcanzó una profundidad de 139,90 m fue ubicada a la media ladera hacia la zona este de estudio Figura 26, fue realizada en diámetro HQ hasta los 33,10 m y posteriormente cambiado el diámetro de perforación a NQ. El nivel freático medido durante los últimos días de la perforación fue de 34,00 m.



Figura 26. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-01. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción Litológica:

Esta perforación comprende inicialmente 15,45 m de depósito de vertiente clasto soportado y localmente matriz soportado, conformado por clastos de roca limolita en una matriz limo-arenosa, luego se presentan intercalaciones de limolitas, tobas laminadas y tobas de cristales, alcanzándose una profundidad total de 139,90 m, en ciertos tramos se evidencian rocas de falla como protocataclasita y protomilonita. En general las limolitas se presentan en horizonte de meteorización IIA con resistencia R1, las tobas de cristales son un poco más competentes,

presentan horizonte de meteorización IIB y resistencia varía de R2-R3. Para el resto de las unidades los horizontes oscilan entre IIA-IIB y la resistencia R1-R2. En cuanto al RQD varía de 0% a 52%, siendo mayor cuando aparecen las tobas de cristales. La Figura 27 muestra las diferentes litologías encontradas en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 4.

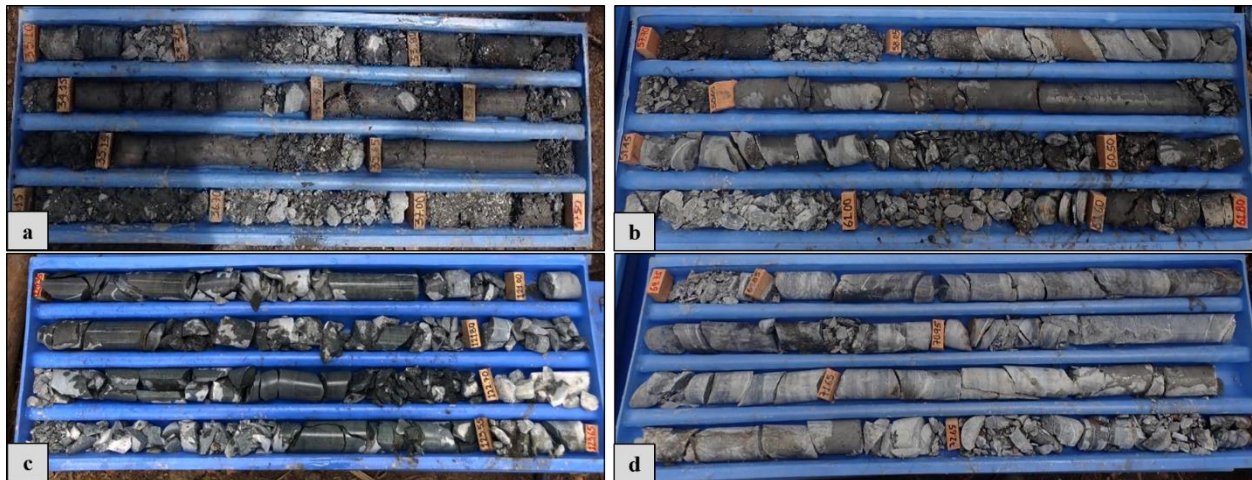


Figura 27. Perforación PS-PR-CO-01. A) Limolita en horizonte de meteorización IIA y resistencia S_1 , Caja #9. b) Toba laminada en horizonte de meteorización IIB y resistencia R1, Caja #15. c) Toba de cristales en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2, Caja #32. d) Protomilonita en horizonte de meteorización IIB, resistencia R2, Caja #27.

7.1.4 PS-PR-CO-02

Esta perforación se localiza en la margen izquierda del río, en la parte baja de la ladera, cerca de lo que sería el portal de salida Figura 28, se alcanzó una profundidad de 50,80 m de profundidad y fue realizada en diámetro de perforación NQ. Se encontró el nivel de agua en promedio a los 41,75 metros.

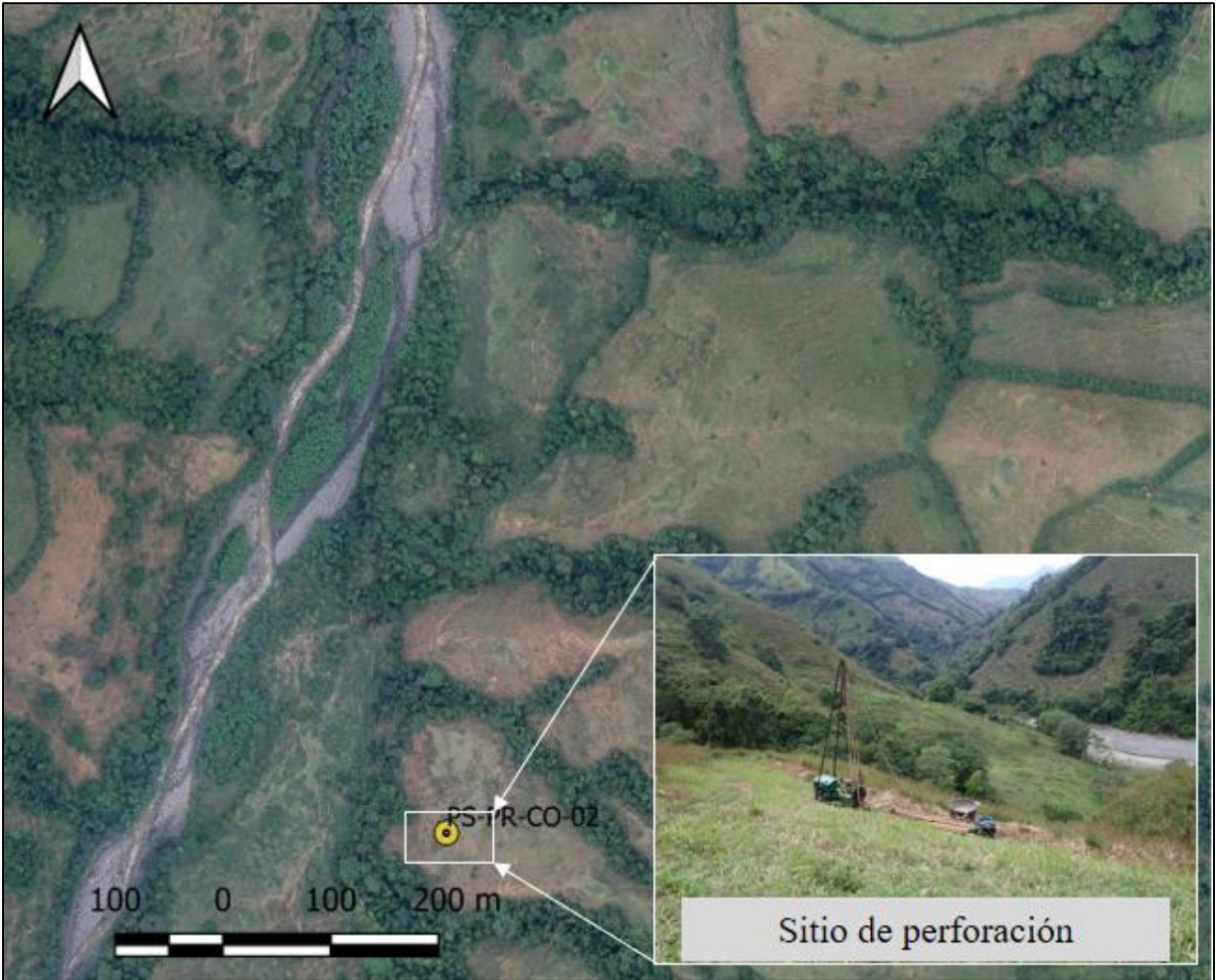


Figura 28. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-02. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción Litológica:

La perforación está representada inicialmente por 39,20 m de un depósito de vertiente matriz soportado con algunos niveles clasto soportados, seguidamente se encuentra un nivel de areniscas clasificadas como grauvacas hasta los 46,45 m con RQD bajo a nulo. Por último, un nivel de limolita con un espesor de 4,35 m y RQD nulo. De manera general las areniscas presentan una resistencia R2- R3, en horizonte de meteorización IIA y las limolitas presentan una resistencia R1, en horizonte de meteorización IIA. La Figura 29 muestra las diferentes litologías encontradas

en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 5.



Figura 29. Perforación PS-PR-CO-02. a) Grawaca en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1-R2, caja #9. b) Limolita carbonosa en horizonte de meteorización y resistencia R1 caja #10

7.1.5 PS-PR-CO-03

Esta perforación se encuentra al lado este de la zona de estudio (Figura 30), cerca de obras de derivación y cercana a la perforación PS-PR-OD-01. Se alcanzó una profundidad total perforada de 60,50 m en un diámetro NQ. El nivel freático oscilaba entre 22,70 m y 27,60 m durante los días que se realizó la perforación.



Figura 30. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-03. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción Litológica

La perforación inicia en un depósito de vertiente en general matriz soportado, con un espesor de 22,00 m, seguido de una intercalación de tobas laminadas y tobas de cristales con espesor de 29,50 m, luego se encontró un nivel de limolita carbonosa con espesor de 9,00 m, y por último un nivel de 1,0 m de espesor de tobas de cristales, para un total de 60,50 metros perforados. Las capas exhiben horizontes de meteorización IC a IIB y valores de resistencia de R1 a R2. No presenta porcentajes de RQD, debido al alto fracturamiento del material. La Figura 31 muestra las

diferentes litologías encontradas en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 6

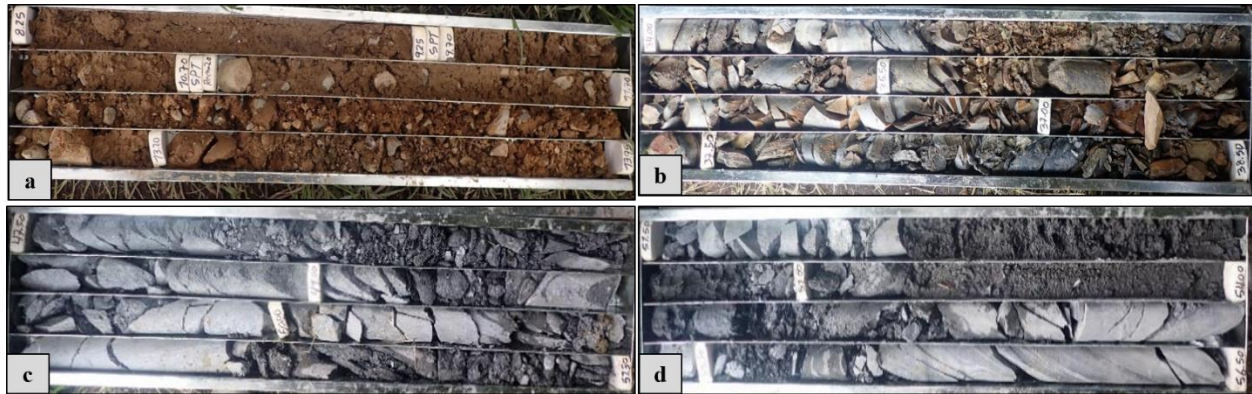


Figura 31. Perforación PS-PR-CO-03. a) Depósito de vertiente matriz soportado, caja #2, Toba laminada en horizonte de meteorización IIA, resistencia R1, Caja # 7. c) Toba de cristales en horizonte de meteorización IIB, resistencia R1- R2, Caja # 10. d) Limolita carbonosa en horizonte de meteorización IIB, resistencia R1, Caja # 11

7.1.6 PS-PR-CO-04

Este sondeo se encuentra a media ladera, hacia el oeste de la zona de estudio (Figura 32), fue realizada en diámetro HQ, se alcanzó una profundidad de 230,0 m y hasta los primeros 34,0 m de perforación el nivel freático estaba en promedio en 7,0 m, de 34,0 en adelante el nivel se mantuvo seco.



Figura 32. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-04. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción litológica

Esta perforación comprende inicialmente un suelo residual de 10,0 m, seguido de un nivel de 9 metros de espesor de limolita, luego una intercalación de toba de cristales, tobas laminadas y algunos niveles de limolita con un espesor de 175,50 m, por último, se encuentran niveles de limolita y limolita carbonosa con un espesor de 54,50 m. En general se encuentran horizontes de meteorización IIA y IIB, resistencias R2 a R3 y fracturamiento alto a moderado. En cuanto al RQD, éste oscila entre 0% y 20%, y algunos niveles de hasta 59%, siendo encontrados en las capas

de toba de cristales en los primeros 50 mts. La Figura 33 muestra las diferentes litologías encontradas en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 7.

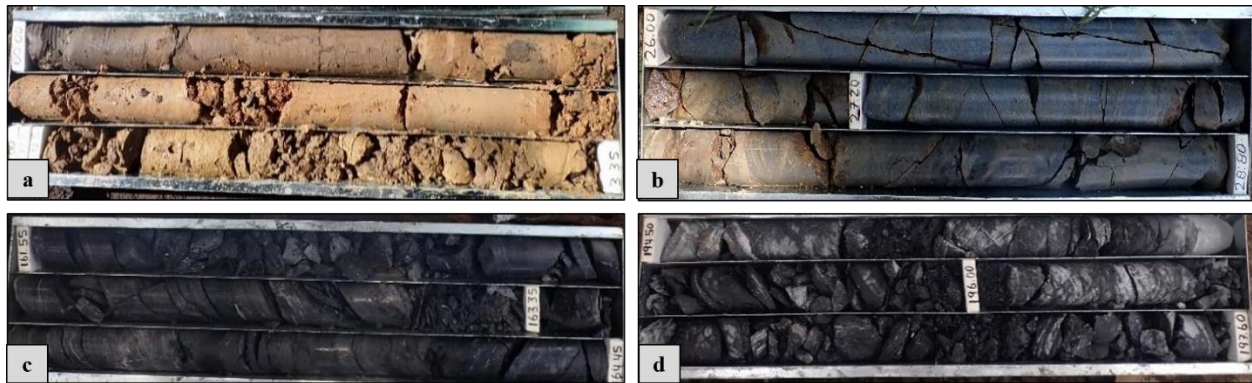


Figura 33. Perforación PS-PR-CO-04 a) Suelo residual, Caja #1. b) Toba de cristales en horizonte de meteorización IIA resistencia R3, Caja #9. c) Toba laminada en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2, Caja #57. d) Limolita en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2, Caja #68.

7.1.7 PS-PR-CO-05

Esta Perforación se ubicó al este de la zona de estudio en la parte baja de la ladera (Figura 34), cerca de la perforación PS-PR-CO-03. El objetivo de esta perforación consistió en atravesar la zona de la Falla Salamina Oeste, por lo tanto, a diferencia de los demás sondeos esta perforación tuvo una inclinación de 70° y un azimut de 90° , alcanzo una profundidad de 60,0 m en un diámetro de perforación NQ.



Figura 34. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-05. (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción litológica

Este sondeo inicia con un depósito de vertiente clasto soportado con un espesor de 22,50 m, seguido por un nivel de toba de cristales de 3,4 m de espesor, luego un nivel de toba laminada con espesor de 4,1 m y por último se encontró un nivel de rocas afectadas por deformación ductil clasificadas como protomilonita con un espesor de 23,70 m. La Figura 35; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las diferentes litologías encontradas en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 8.



Figura 35. Perforación PS-PR-CO-05 a) Toba de cristales en horizonte de meteorización IIA, resistencia R1, caja #5. b) Protomilonita en horizonte de meteorización IIA, resistencia R1, caja #8

7.1.8 PS-PR-CO-06

Esta perforación se ubica al este de la zona de estudio, en la parte alta de la ladera (Figura 36), el nivel freático está en promedio a los 42,40 m.

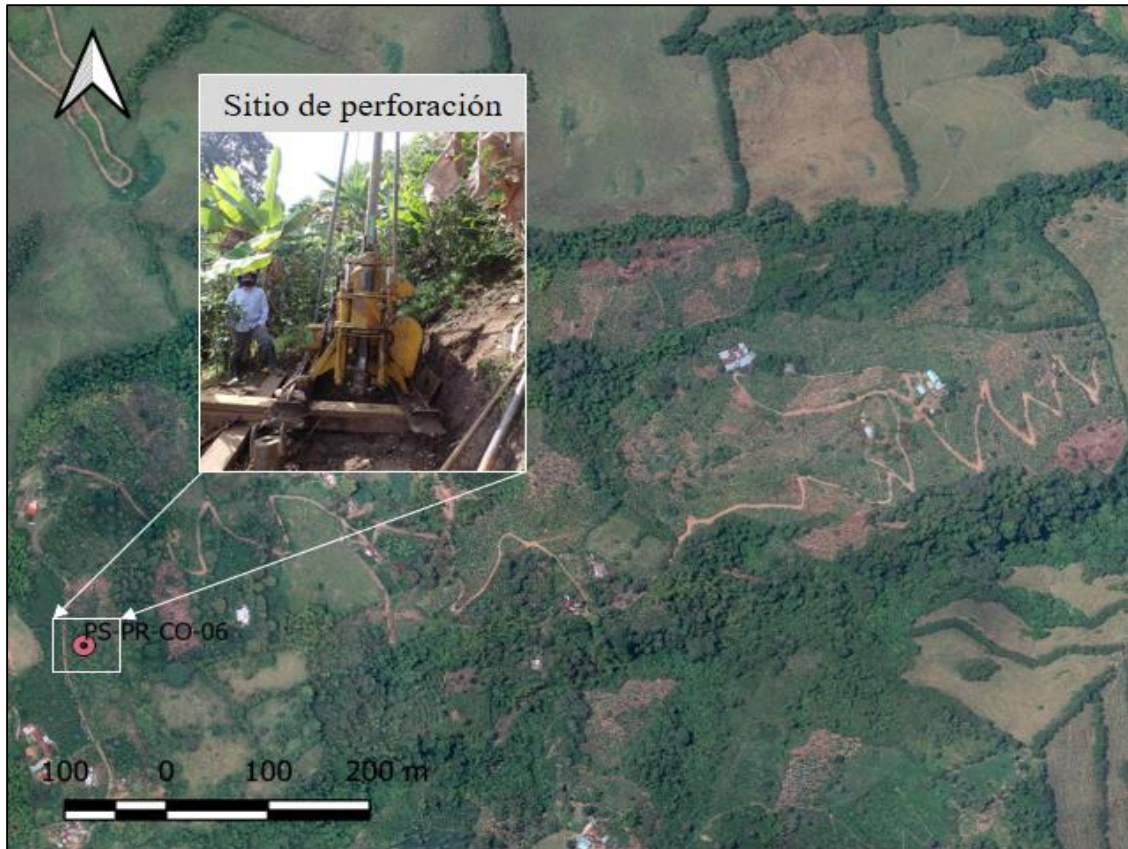


Figura 36. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-06 (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción litológica

Este sondeo está conformado inicialmente por un suelo residual de 2,40 m de espesor, seguido de intercalaciones de tobas laminadas, tobas de cristales, tobas líticas y algunos niveles de limolitas. Los horizontes de meteorización se encuentran en IC a IIB y resistencias entre R2 y R3, es notable el alto grado de fracturamiento. La perforación alcanza una profundidad total de 110,00 m. La Figura 37 muestra las diferentes litologías encontradas en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 9.

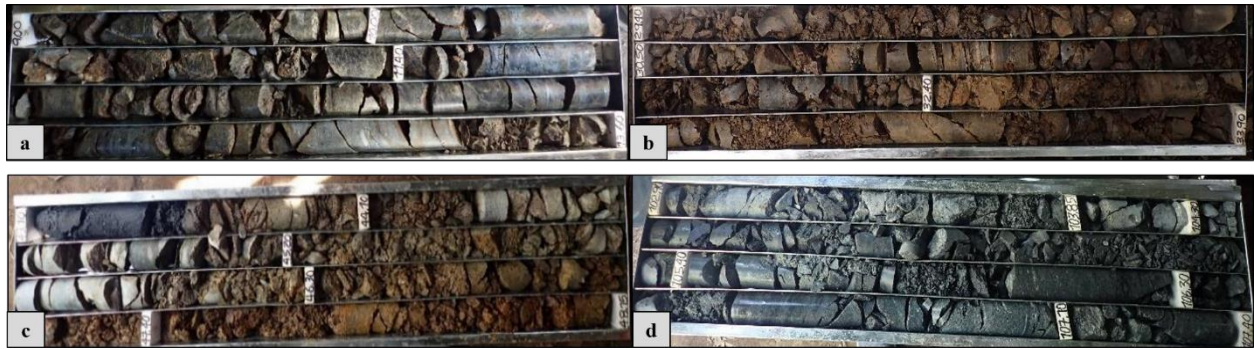


Figura 37. Perforación PS-PR-CO-06 a) Toba de cristales en horizonte de meteorización IIA, resistencia R2, caja #2. b) Toba laminada en horizonte de meteorización IIA, resistencia R2, caja #6. c) Toba lítica en horizonte de meteorización IIA, resistencia R1, caja #6. d) Protomilonita en horizonte de meteorización IIA, resistencia R2, caja #6

7.1.9 PS-PR-CO-07

Esta perforación se ubica en la parte alta de la ladera, en la parte central de la zona de estudio (Figura 38), se alcanzó una profundidad total 42,50 m. El nivel freático permaneció seco durante la perforación.

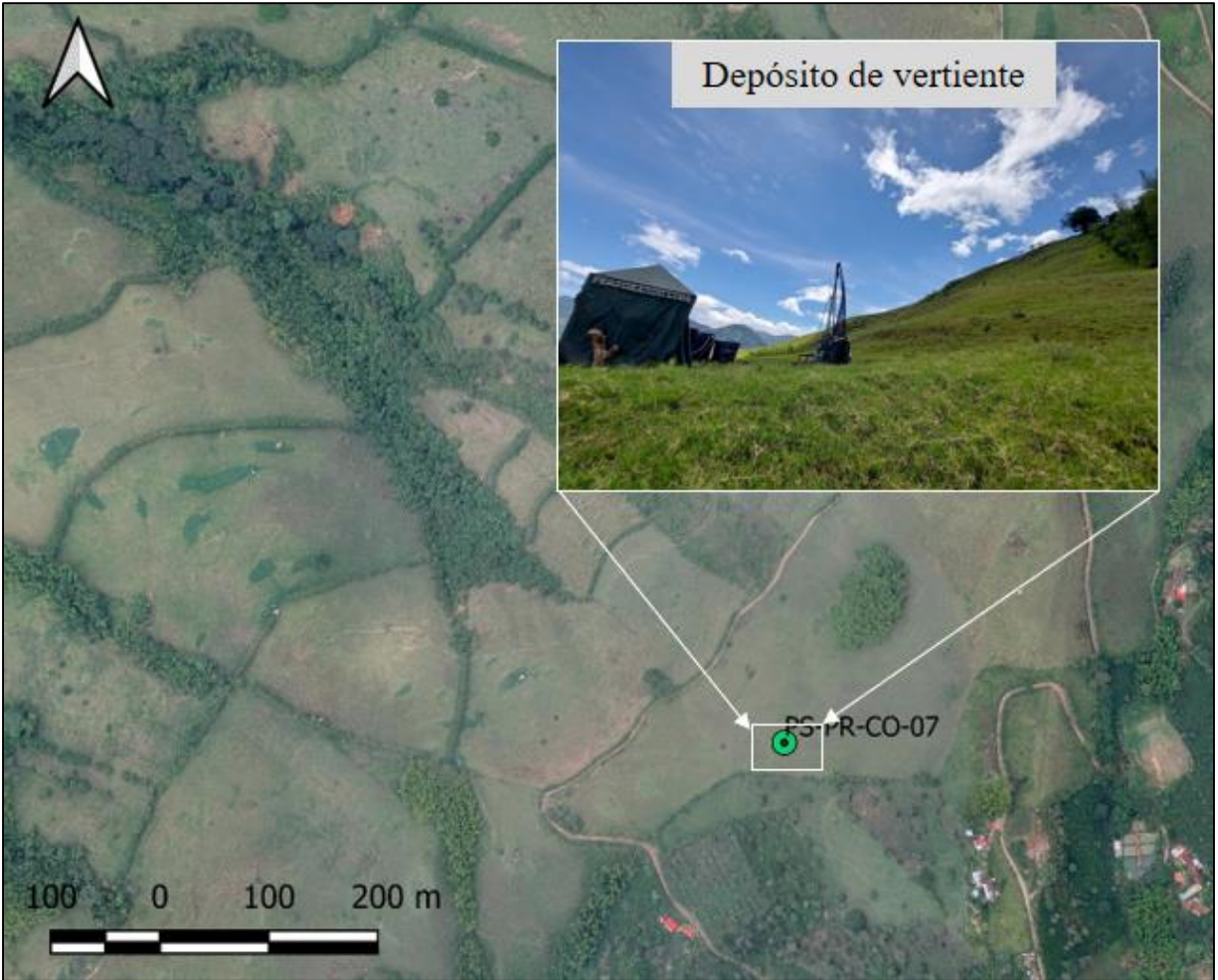


Figura 38. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-07 (Imagen de localización tomada de ortofoto LIDAR)

Descripción litológica

En esta perforación se encontró inicialmente un depósito de vertiente de 29,50 m de espesor, seguido de una zona de transición suelo-roca donde es posible observar remanentes de limolita hasta un 10%, esta zona presenta un espesor de 13,00 m. Para este sondeo se tenía planteado perforar hasta los 70 m, pero debido a la complejidad del material y a la inestabilidad del pozo se perforó hasta los 42,50 m. La Figura 39 muestra las diferentes litologías encontradas

en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 10.

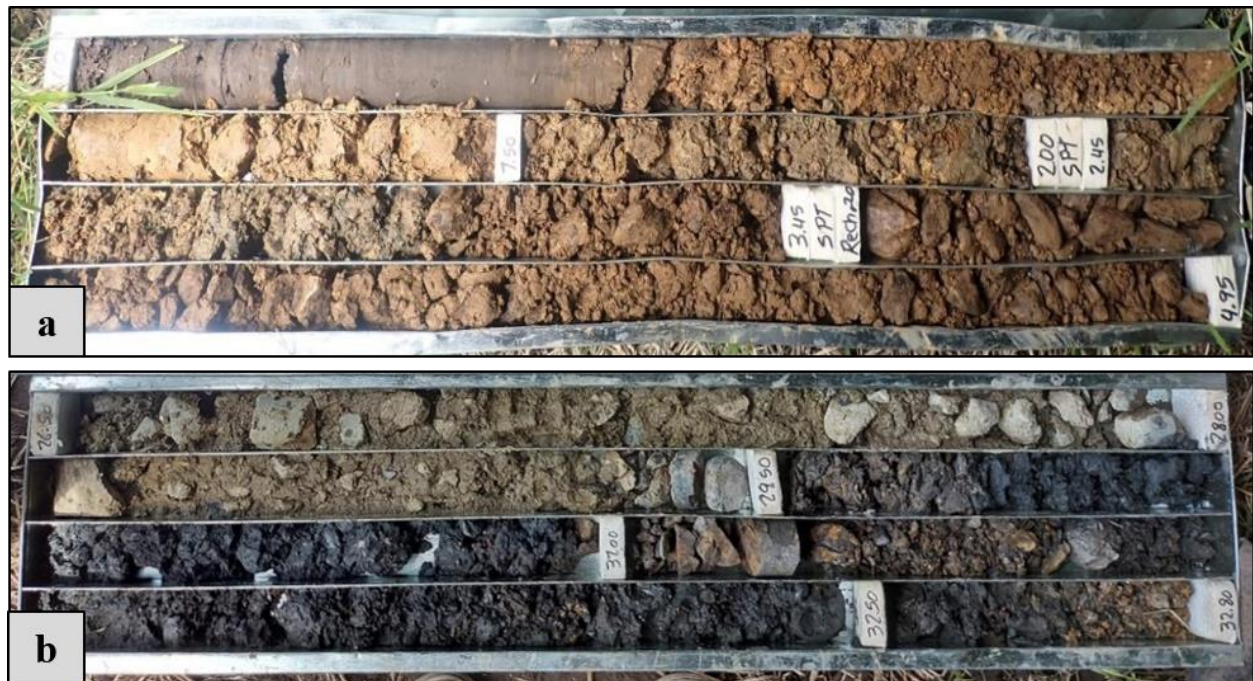


Figura 39. Perforación PS-PR-CO-07 a) Depósito de vertiente matriz soportado, caja #1. b) Zona de transición suelo- roca, caja #8

7.1.10 PS-PR-CO-08

Este sondeo se ubica al oeste de la zona de estudio en la parte media de la ladera (Figura 40), se realizó en diámetro NQ y alcanzó una profundidad total 150,0 m. El nivel freático se encontró a los 21,80 m.



Figura 40. Localización y detalle del sitio de la perforación PS-PR-CO-08

Descripción litológica

Esta perforación comprende inicialmente un depósito de vertiente clasto soportado de 20,0 m de espesor, seguido se encuentran tobas de cristales con espesor de 48,80 m, tobas laminadas con espesor de 1,50 m de espesor y Grawacas con espesor de 46,30 m, para un total de 150,0 m perforados. La Figura 40 muestra las diferentes litologías encontradas en el sondeo. La descripción detallada de la columna estratigráfica de esta perforación se encuentra en el Anexo 11.



Figura 41. Perforación PS-PR-CO-08 a) Toba de cristales en horizonte de meteorización IIA, resistencia R2, caja #26. b) Grawaca en horizonte de meteorización IIA, resistencia R3, caja #32

8. ANALISIS ESTRUCTURAL

La zona de estudio se encuentra limitada hacia el oeste por la falla Romeral, presente en el área de estudio con un buzamiento de 70° a subvertical, y al este por la falla Salamina Oeste, la cual se ha podido identificar por zonas de cizalla, con una orientación N-S y un buzamiento de 65° hacia el SW.

Dentro de la tectónica N-S característica del sistema de Fallas de Romeral, a la cual pertenecen entre otras, las fallas Romeral y Salamina Oeste, aparecen una serie de estructuras perpendiculares a las estructuras principales, evidenciadas por la rectitud de tramos en la red fluvial, estas presentan direcciones E-W, NEE-SWW Y NWW-SEE. Las tendencias se relacionan en el análisis estructural conceptual (Figura 42 y Figura 43), usando el modelo de fracturamiento de Riedel (1929).

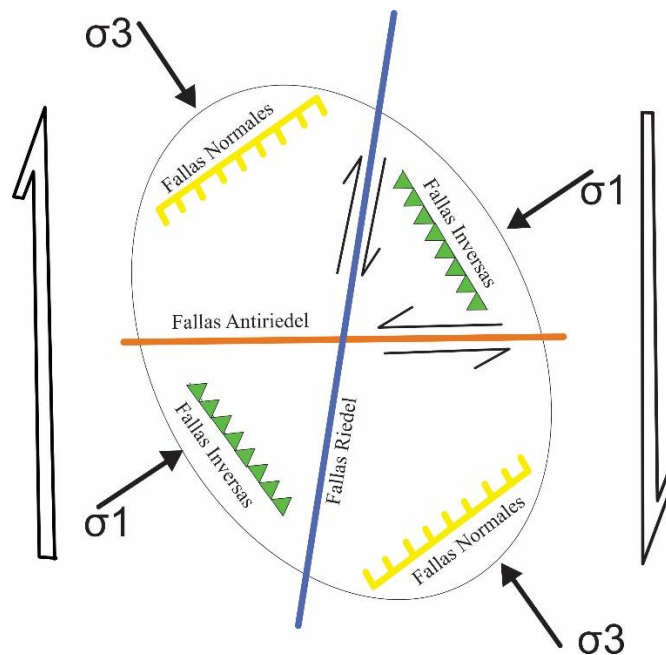


Figura 42. Elipse de deformación para un sistema tranpresivo con componente de tipo dextral para la zona del Proyecto (modificado de Rosello, 2009))

Se determinó para la zona de estudio un fallamiento general dextralateral con componente inverso, desarrollando una configuración de fracturamiento representado por la presencia de estructuras subparalelas a la zona de cizalla principal (fallas riedel), y fallas casi perpendiculares (Antiriedel), estructuras geológicas de tipo compresivas (fallas inversas) y extensivas (fallas normales).

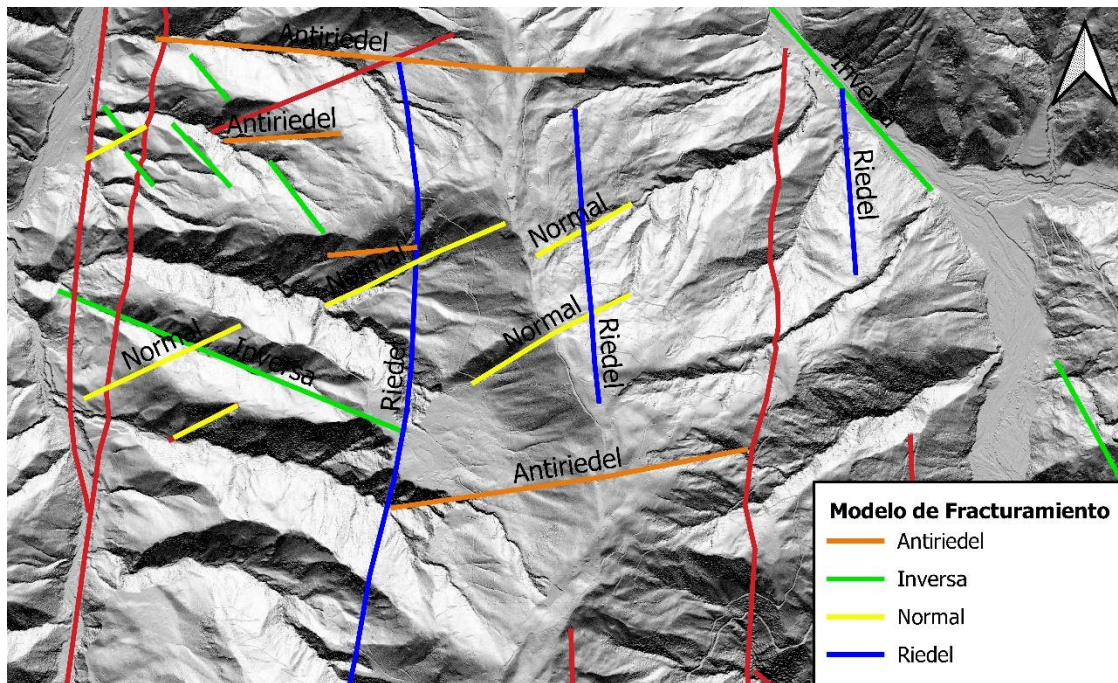


Figura 43. Modelo de fracturamiento interpretado para la zona del Proyecto Salamina.

Para entender la configuración estructural de la zona en profundidad se realizó un perfil geológico interpretativo en sentido W-E que se presenta en la Figura 44.

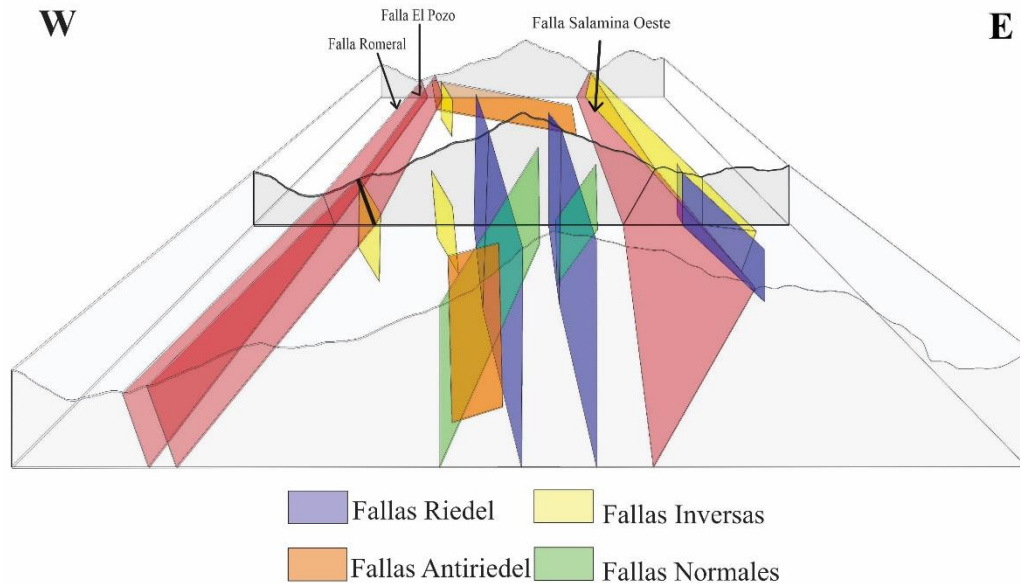


Figura 44. Perfil interpretativo de fallas principales para la zona de estudio.

A partir de la configuración tectónica definida para la zona de estudio, la cual se considera transpresiva, donde la cizalla principal según los resultados ya expuestos presenta una cinemática dextral inversa, es posible que las fallas Salamina Oeste, Romeral y las fallas sintéticas a estas configuren una estructura en flor positiva, o bien, constituyan un “Pop up” o bloque emergente dada la componente en buzamiento de carácter inverso en las fallas principales y la vergencia contraria de las mismas. Sin embargo, esta última propuesta es menos probable, puesto que la cinemática interpretada presenta un mayor componente en rumbo, característica que coincide con trabajos realizados por diversos autores, lo que indicaría a luz de los datos que en el área de estudio la configuración corresponde a una flor positiva.

Los datos estructurales tomados en campo evidencian la presencia de pliegues escalonados en la zona de estudio; teniendo en cuenta la disposición de la superficie axial de cada uno de los pliegues, se puede indicar que estos son en general inclinados, los pliegues cercanos a las fallas

principales son cerrados y presentan flancos invertidos, mientras los que se encuentran en medio de la cizalla principal limitada por las fallas Romeral y Salamina Oeste, son abiertos y no parecen tener inversión en sus flancos (Figura 45). El ángulo interflancos en estos pliegues varía desde los 22° a 117°.

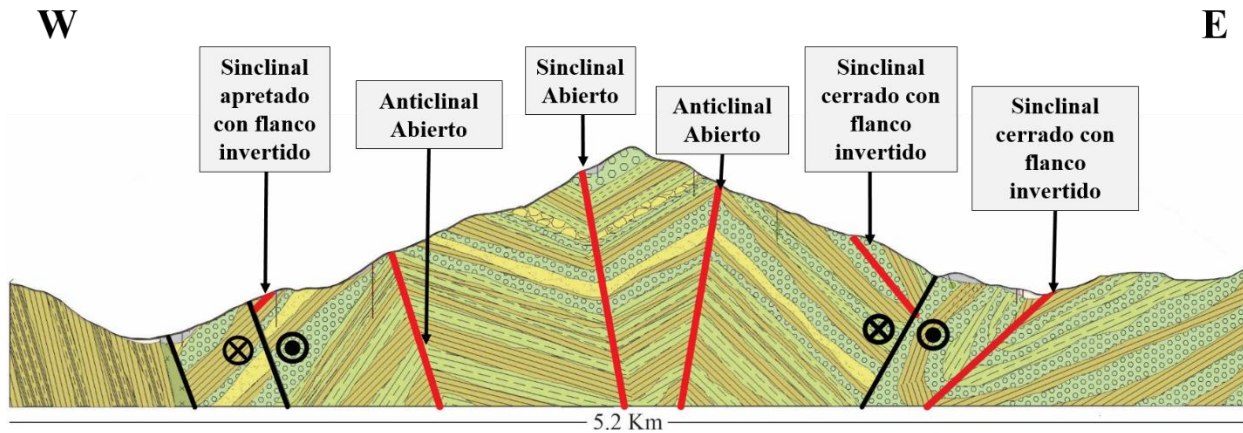


Figura 45. Clasificación Pliegues zona de estudio

La dirección preferencial de la superficie axial de los pliegues es NNE- SSW (Figura 46) y corresponde con las direcciones de cizalla dúctil reportadas por Moreno-Sánchez *et al.*, (2016) en protomilonitas, milonitas y ultramilonitas del Complejo Quebradagrande en las áreas circundantes a Manizales y Villamaria, esto podría indicar que el campo de esfuerzos del cual ha sido derivada esta deformación en el Complejo Quebradagrande pudo presentar una orientación cercana a la E-W. A partir de la disposición de los ejes y superficies axiales, y relacionando las zonas de cizalla descritas por Moreno-Sánchez *et al.*, (2016), se considera que los eventos deformativos tuvieron lugar en un régimen transpresivo dextral, en donde los esfuerzos de cizalla pura y simple se concentran subhorizontalmente y en direcciones cercanas a la E-W, y el aplastamiento y elongación se presentan en un plano subvertical.

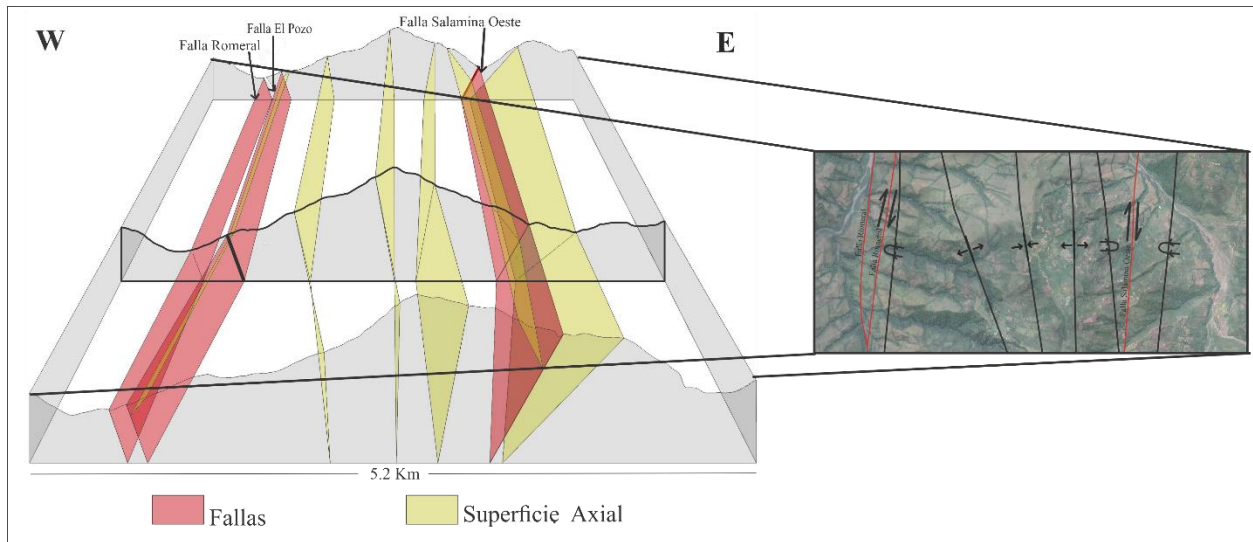


Figura 46. Vista interpretativa de perfil y en planta asociada a los ejes de los pliegues presentes en la zona.

9. MODELO GEOLOGICO

Según Nivia et al, (2006), el Complejo Quebradagrande fue formado durante el Cretácico Inferior en una zona de suprasubducción, asociado a un proceso de *rollback* que produjo distensión y adelgazamiento de la corteza sobre el margen continental formando una cuenca marginal (Figura 47).

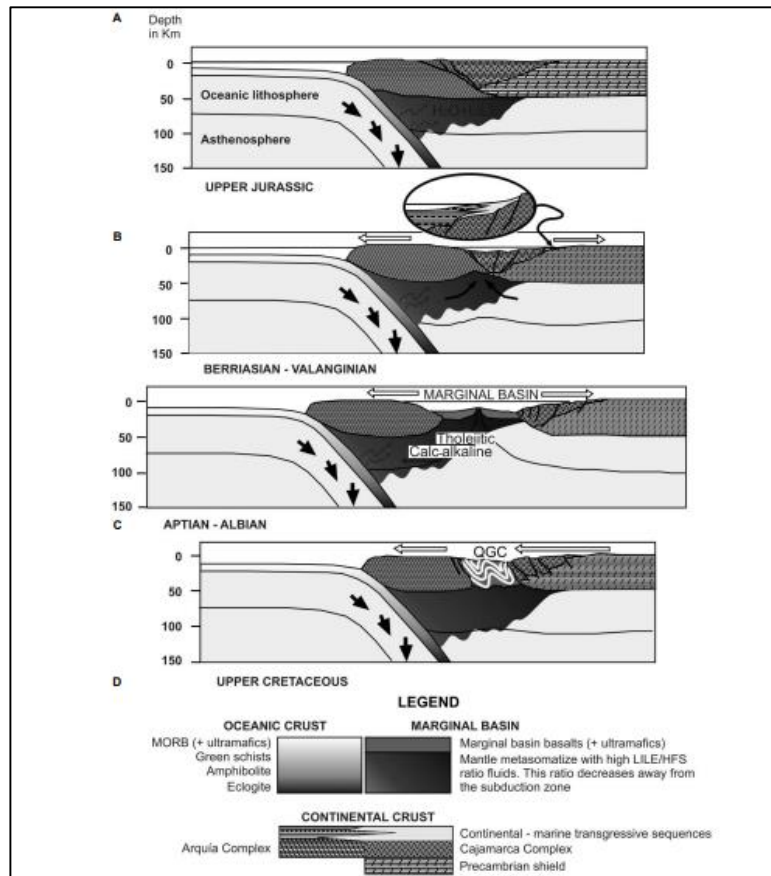


Figura 47. Diagrama esquemático que ilustra la evolución de la cuenca ensiálica marginal del Complejo Quebradagrande-QGC. a). Subducción y consecuente metasomatismo del manto subcontinental bajo la corteza paleozoica de un bloque de la corteza oceánica (Complejo Arquía) acrecionado al bloque de la corteza continental (Complejo Cajamarca + escudo). b). El retroceso del margen continental conduce al adelgazamiento litosférico y la posterior generación de cuencas y fusión del manto adiabático. c). Formación de cuenca marginal por generación de suelo oceánico en la zona de expansión del arco posterior. d). Cierre de cuenca, probablemente debido a fuerzas producidas sobre la placa continental durante la apertura del Atlántico Sur. Tomado de Nivia et al, (2006).

Esta interpretación se ajusta a la reconstrucción paleogeográfica que realizan Moreno-Sanchez & Pardo-Trujillo (2003) para el Cretácico Inferior (Figura 48a), donde se evidencia un estiramiento continuo en la corteza continental que provoca la generación de un basamento marino protocaribeño, separando bloques de la corteza continental sudamericana. Para finales del Cretácico Inferior inicia el cierre de esta cuenca protocaribeña, como producto de la aproximación del arco volcánico y la colisión oblicua entre la Placa del Caribe y el borde noroccidental de la Placa Suramericana, causando un desplazamiento de rocas sedimentarias y volcánicas sobre el basamento metamórfico de la Cordillera Central y dando lugar a la mezcla tectónica de rocas que conforman el Complejo Quebradagrande (Moreno Sanchez & Pardo Trujillo, 2003).

A finales del Cretácico superior la actividad de la Placa del Caribe produjo un deslizamiento dextral entre las rocas del Complejo Cajamarca y Quebradagrande (Figura 48b) dando lugar a una megacizalla que se extiende hasta las rocas metamórficas del borde occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta (Moreno Sanchez & Pardo Trujillo, 2003). Estos autores, resaltan que desde el paleoceno a la actualidad el desplazamiento dextral de la Placa del Caribe en el norte de Colombia y Venezuela es similar a su actividad en el Cretácico Superior.

De acuerdo con la reconstrucción paleogeográfica realizada por Moreno-Sanchez & Pardo-Trujillo (2003) y modelos de evolución propuestos por Pindell & Kennan, (2009), se puede sugerir que los plegamientos identificados en la zona de estudio tuvieron ocurrencia a finales del Cretácico Inferior derivado del cierre de la cuenca marginal, generando adicionalmente en las rocas una orientación y elongación en sus clastos. De igual manera estas rocas se vieron afectadas por régimen de deformación frágil ocasionado por las colisiones oblicuas entre la Placa Caribe y

Suramericana en el Cretácico Superior, dando como resultado el marco tectónico transpresivo en la región occidental de la cordillera Central, donde tiene lugar la actividad del sistema de Fallas Romeral y dentro de este las fallas objeto de estudio, Falla Romeral y la Falla Salamina.

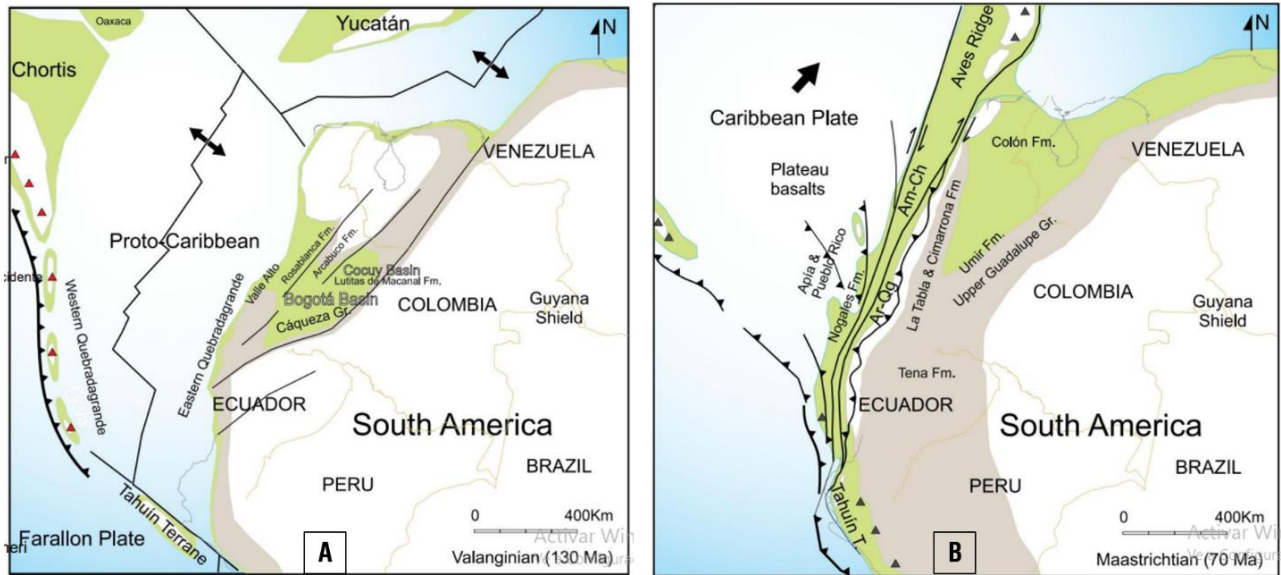


Figura 48. a.) Reconstrucción paleogeográfica del Valanginiano (alrededor de 130 Ma) del noroeste de América del Sur. b) Reconstrucción paleogeográfica del Maastrichtiano (alrededor de 70 Ma) del noroeste de América del Sur. Tomado de (Moreno Sanchez & Pardo Trujillo, 2003)

Las Figura 49 y Figura 50 muestran los bloques diagrama correspondientes al modelo geológico del área de interés, donde se puede apreciar la geometría y relación entre las litologías presentes. Este fue dividido en bloque A y bloque B.

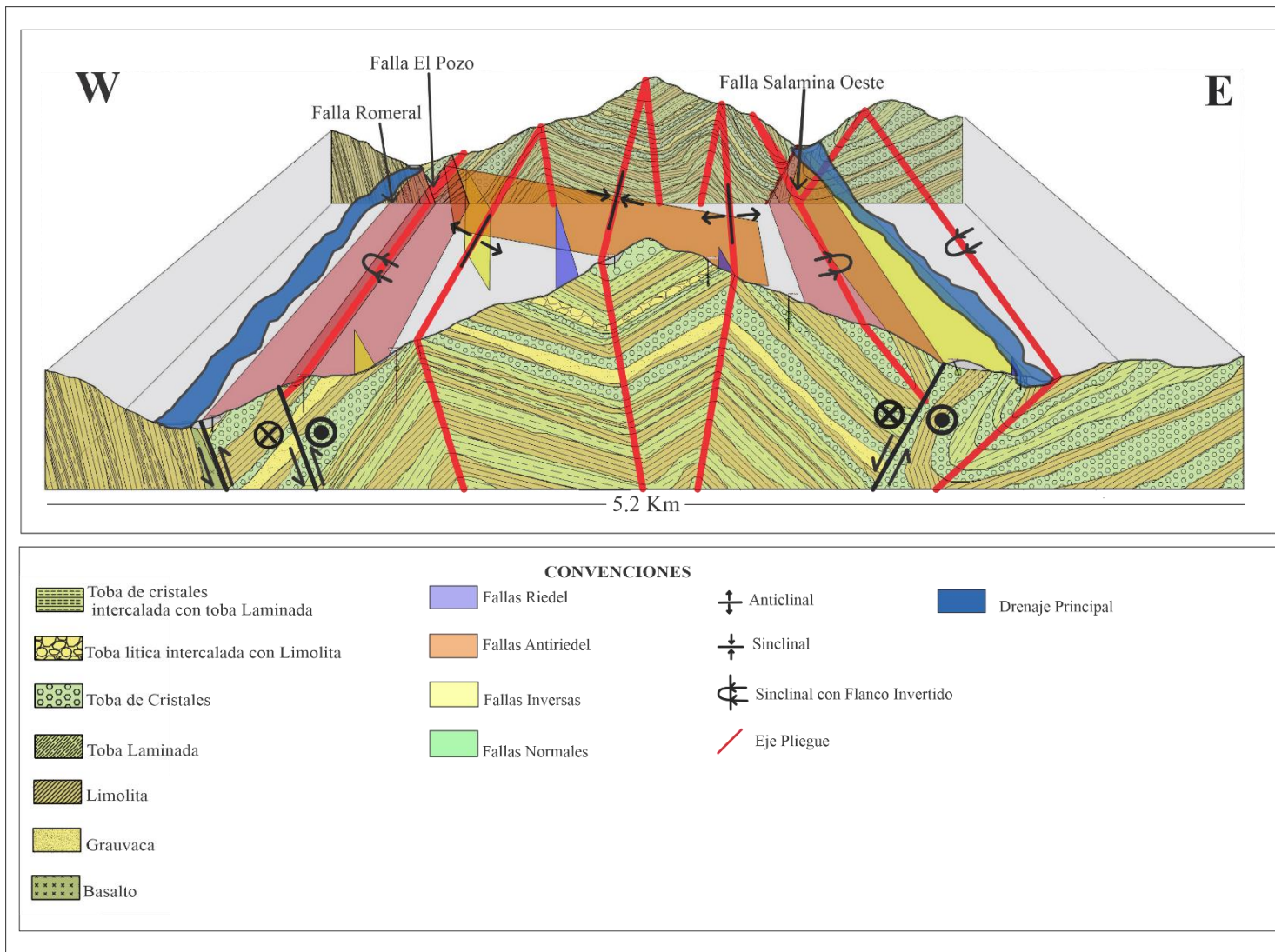


Figura 49. Modelo Geologico Para la zona de estudio BLOQUE A

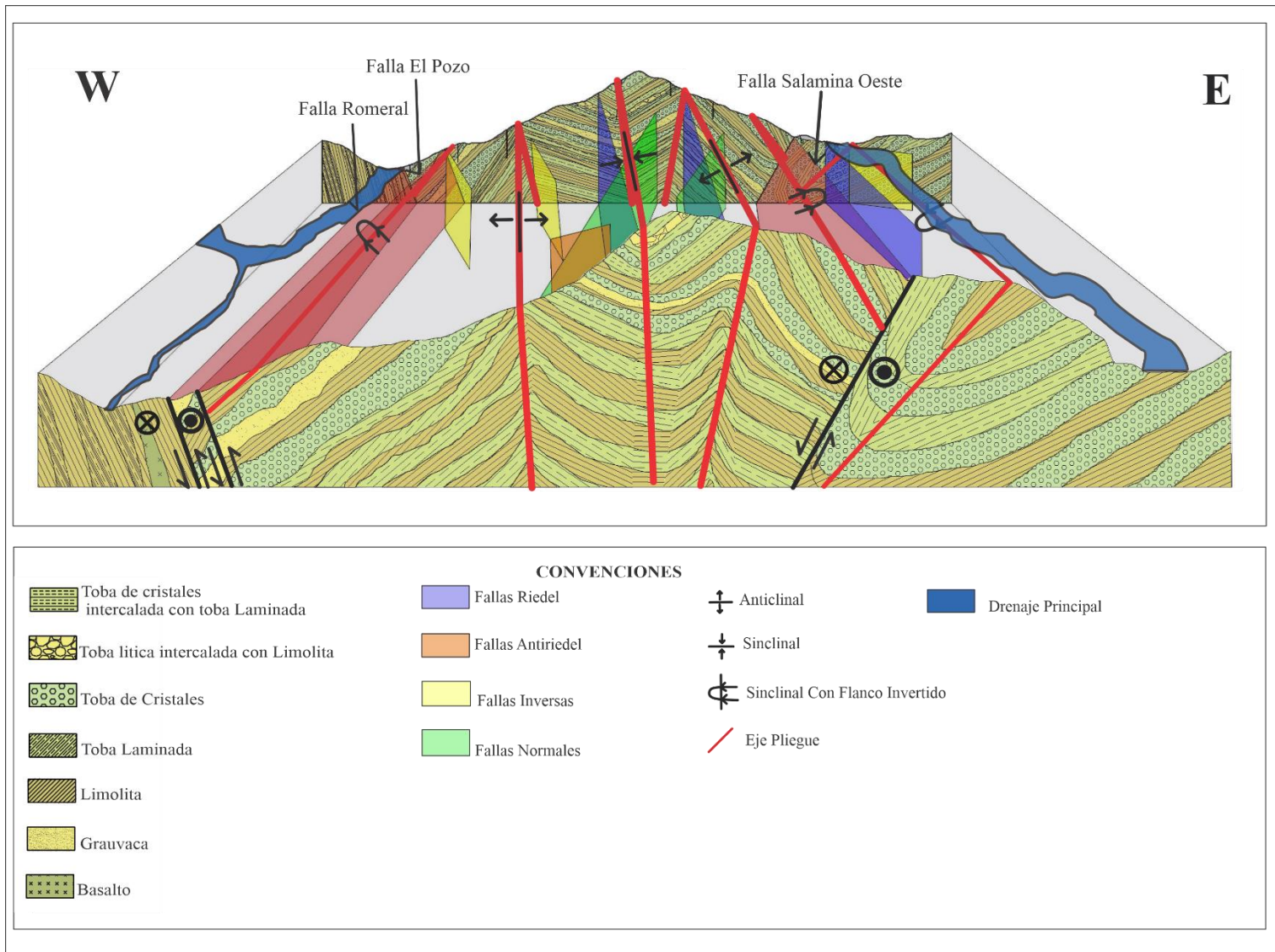


Figura 50. Modelo Geologico Para la zona de estudio BLOQUE B

10. CONCLUSIONES

- A partir de la campaña de exploración realizada se pudo establecer que el Complejo Quebradagrande Litodema Volcánico, es la única unidad geológica aflorando en la zona de estudio a diferencia de lo reportado por otros autores a nivel regional.
- De acuerdo a las tendencias reconocidas en la campaña de exploración y proyectadas en el modelo geológico se concluye que las rocas aflorantes del Complejo Quebradagrande presentan orientaciones preferenciales de buzamiento al NE y NW variando sus grados de inclinación de 20° a verticales, interpretándose así una secuencia de anticlinales y sinclinales escalonados con orientación de sus ejes axiales hacia el NNE-SSW.
- Se identificaron protomilonitas en afloramientos y algunos niveles en los sondeos, estas se encontraban distribuidas aleatoriamente como franjas heterométricas, resultado de zonas de deformación dúctil, que posiblemente fueron disgregadas por la actividad transpresiva presente en la zona de estudio.
- Fue posible identificar de manera general dos eventos deformativos: un primer evento en el régimen dúctil, el cual posiblemente ocurrió para finales del Cretácico Inferior, y el cual estaría asociado al cierre de una cuenca marginal, con lo cual se dio origen a los pliegues escalonados y algunos niveles de protomilonitas. Y un segundo evento en el régimen frágil sobreimpuesto a la deformación dúctil, el cual probablemente ocurrió para el Cretácico Superior como consecuencia de deslizamientos dextrales asociados a la actividad de la Placa Caribe, generando las

estructuras frágiles relacionadas al Sistema de Fallas Romeral, las cuales han producido alto fracturamiento y zonas de cizalla frágil en la zona de estudio.

- Es posible que el área de estudio haga parte de una estructura en flor positiva formada por el Sistema de fallas Romeral, debido a la combinación del movimiento en rumbo dextral y componente inverso de las estructuras que la conforman.
- En definitiva, los valores de RQD obtenidos en los sondeos, reflejan el alto fracturamiento en la zona de estudio asociado a la deformación frágil presente. Sin embargo, fue posible determinar que los valores más altos de RQD se encontraron asociados a rocas clásticas, clasificadas como tobas de cristales, siendo estas las rocas más competentes y resistentes a la deformación, por el contrario, los valores bajos o nulos se encuentran relacionados a las limolitas, siendo este el material más incompetente y susceptible a la deformación frágil.
- Se debe tener presente que el parámetro RQD medido durante el logueo geológico, puede no ser representativo y generar sobreestimaciones al valorar la viabilidad del proyecto, esto debido a que el método de perforación propicia también fracturas infringidas. Por tanto, se recomienda evaluarse alternativamente con otros parámetros geotécnicos adicionales que permitan adquirir un mayor conocimiento de las condiciones reales del macizo rocoso.
- En caso de avanzar en el proyecto, se sugiere ejecutar exploración directa e indirecta centradas en describir y obtener mayor información de la actividad del sistema de Fallas Romeral, en específico para las Fallas Romeral y Salamina relacionadas en este trabajo.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Pindell, J., & Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. Geological Society.
- Álvares, J. (1995). Geología del Complejo Ofiolítico de Pacora y secuencias relacionadas se arco de islas (Complejo Quebradagrande), Colombia. *INGEOMINAS*.
- Arango, M., & Rodríguez, G. (2013). Reinterpretación geoquímica y radiométrica de las metabasitas del Complejo Arquia. *Boletín de Geología Vol. 35, N° 2*.
- Aristizabal, E., Valencia, Y., Guerra, A., Echeverry, O., & Velez, M. (2011). *Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales*.
- Beltrán, & Correa, M. (2015). *Cartografía geológica, caracterización y cálculo de reservas; en el área de concesión lh0159-17, quebrada Maibá - La merced - Caldas, del contrato interadministrativo no. Ggc189, suscrito entre el MME - ANM Y UPT. Sogamoso*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Botero A, G. (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Facultad de minas*.
- Calle, B., & González, H. (1982). *Geología y geoquímica de la Plancha 186, Riosucio. Informe 1878. Versión 1982*. Medellín: INGEOMINAS.
- Calvache, M., Trejos, G., Gamboa, C., Sandoval, J., Barrera, L., Carvajal, J., . . . Ruiz, G. (2013). *Memoria explicativa geomorfología Plancha 187 Salamina, Departamentos de Caldas y Antioquia*. Bogotá: SGC.
- Castilla, J., & Herrera, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID.
- Deere, D., & Patton, F. (1971). Slope stability in residual soils. *Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (págs. 87-170). Puerto Rico.
- Deere, D., Peck, R., Parker, H., & Monsees, j. (1970). Design of Tunnel Support Systems. *Highway Research Record, No. 339, Junta de Investigación de Carreteras*, 26-33.
- Feijoo, E., & Padrón, J. (2020). *Resistividad de rocas y su relación con la resistencia a compresión simple en mina*.

- Gómez Hurtado, E., Hincapié Jaramillo, G., & Marín Marín, J. (2012). Análisis de paleoesfuerzos mediante datos de fallas estriadas en el "Stock" de Chinchiná-Santa rosa, en la Cantera La Virgen Manizales, Caldas. *GEOLOGÍA COLOMBIANA. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica*. 37.
- Gómez, J., & Montes, N. (2020). Mapa Geológico de Colombia 2020. Escala 1:1 000 000. *Servicio Geológico Colombiano*.
- Gómez, J., Nivia, A., Montes, N., Almanza, M., & Madrid, F. (2015). Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. *Compilando la Geología de Colombia: Una visión a 2015*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 33.
- González. (1993). *Mapa geológico generalizado del departamento de Caldas, escala 1:250.000. Memoria explicativa*. Bogotá: INGEOMINAS.
- González, H. (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Informe 1760. *Boletín Geológico, Vol. 23*(No. 1), p 1-174.
- González, H. (1990). Mapa geológico generalizado del departamento de Caldas, escala 1:250.000. INGEOMINAS.
- González, H. (2001). *Memoria explicativa del Mapa geológico del Departamento de Antioquia, escala 1:400.000*. Bogotá: INGEOMINAS.
- González, H., Agudelo, S., & Calle, B. (1980). Geología de la Plancha 187 Salamina, escala 1:100.000. INGEOMINAS.
- Grosse, E. (1926). Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia. 361.
- ISRM. (1978). *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*.
- Kammer, A. (1993). Las Fallas de Romeral y su Relación con la Tectónica de la Cordillera Central.
- Marjoribanks, R. (2010). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*.
- Maya, M., & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de los Andes Colombianos. *Boletín geológico, Vol. 35*(No. 2-3), p 43-57.
- Moreno Sanchez, M., & Pardo Trujillo, A. (2003). Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate. *Bartolini, C., Buffler, R.T. & Blickwede, J. (editors), The circum-Gulf of Mexico*

- and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics American Association of Petroleum Geologists, Memoir 79, 891-924.*
- Moreno-Sánchez, Hincapié, G., Ossa, C. A., & Toro, L. M. (2016). Caracterización geológico-estructural de algunas zonas de cizalla en el Complejo Quebradagrande en los alrededores de Manizales y Villamaría. *Boletín de Geología*, 38(4): 15-27.
- Nivia, A. M. (2006). El Complejo Quebradagrande: una cuenca marginal ensiálica del Cretácico Inferior en la Cordillera Central de los Andes colombianos. *Revista Sudamericana de Ciencias de la Tierra*.
- Pettijohn, Potter, & Siever. (1987). Sand and Sandstone.
- PI EPSILON. (2018). Diagnóstico ambiental de alternativas (DAA) del proyecto hidroeléctrico Salamina.
- Pi Epsilon. (2021). Informe geológico - trabajos de exploración del subsuelo.
- Quintero, A., & Restrepo, J. (2009). *Caracterización geológica-minera con propósitos de legalización para minería de hecho de material de arrastre en tres minas del departamento de Caldas (Filadelfia-La Merced)*. Manizales: Universidad de Caldas.
- Quintero, D., & Velez, A. (2016). *Análisis comparativo de una escala de trabajo cartográfico 1:25000 frente a una 1:1000, para la zonificación de la amenaza por movimiento en masa en los alrededores de la cabecera del municipio de Salamina*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Centralbl. f. Mineral.*, 354-368.
- Rosello, E. (2009). Control estructural de mineralizaciones: determinación mecánica y pronósticos prospectivos. Medellín, Colombia.
- Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology. The Geological Society of America*.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. 1-33.
- Toussaint, J. (1996). *Evolución geológica de Colombia, Cretácico*. Medellín: Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- Toussaint, J., & Restrepo, J. (1974). La formación Abejorral y sus implicaciones sobre la Evolución de la Cordillera Central de Colombia durante el Cretáceo.

Unión Temporal Dunia-ATG. (2005). *Complementación geológica, geoquímica y geofísica (magnetométrica) de las planchas 166, 167, 186 y 187*. Bogotá: INGEOMINAS.

Van der Hammen, T. (1957). Climatic periodicity and evolution of South American Maestrichtian and Tertiary floras. *Boletín Geológico*.

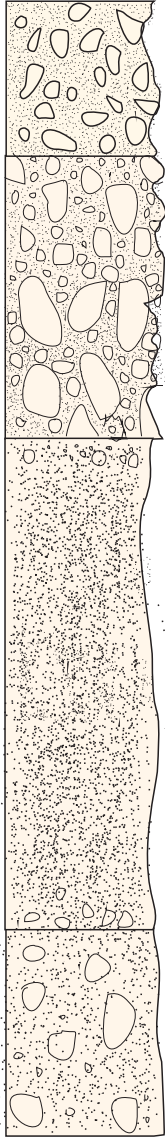
12. ANEXOS

ANEXO 1 : Descripción Secciones Delgadas

NUMERO DE MUESTRA		CCA-005	M1	M-5
DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA		Roca homogénea composicional y texturalmente, grano medio, color gris medio moteado gris claro (N8) con clastos de cuarzo en vividos en una matriz fina gris oscuro (N2) rocas sedimentarias no laminada clásica.	Roca piroclástica laminada con bandas finas negras-gris oscuras (N2-N1) y gris claro- medio (N5) y microaugen dispersos en conjunto con orientación débil. Vulcanita piroclástica con efectos de deformación dúctil.	Roca compacta masiva isotropa de coloración uniforme gris claro, de naturaleza clásica no orientada ni laminada. Roca volcánica piroclástica de grano fino uniforme
DESCRIPCION MICROSCOPICA	CRISTALINIDAD			
	TEXTURA	Piroclástica	Lenticular Flaser	Clastica piroclástica
	ESTRUCTURA	Orientación con débil laminación- Flaser	Orientada	Masiva Compacta no laminada
COMPOSICION	MINERALES ESENCIALES	Cuarzo 13,2 Plagioclasa 49,2%	Cuarzo 38,4% Líticos 6,3 %	Cuarzo 1,9 % Plagioclasa 59,9 %
	MINERALES CARACTERIZANTES	Matriz 37,4	Matriz 55,%	Matriz 35,0 %
	MINERALES ACCESORIOS	Calcita 0,1% Opacos Metalicos 0,1%	Esfena Opacos metálicos 0,3 %	Esfena 0,1 % Opacos 0,1 %
	MINERALES SECUNDARIOS		Minerales arcillosos producto de alteración	Minerales arcillosos producto de alteración
	DESCRIPCIÓN COMPOSICIONAL	FRAGMENTOS	<p>Plagioclasa: Fragmentos de cristales rotos incompletos de habito tabular, bien seleccionados con orientación débil en conjunto de tamaño ceniza fina- muy fina (0,01 – 0,06 mm) con planos de macla según albita – Carlsbad, no zonadas a veces con planos de macla curvados y localmente caolinizados.</p> <p>Cuarzo: Fragmentos ocasionales dispersos de cuarzo monocristalino de aspecto sucio debido a la presencia de microinclusiones solidas de opacos, relieve moderado – alto, con birrefringencia baja y color de interferencia gris de primer orden.</p> <p>Calcita: Mineral secundario como agregado en lentes irregulares alargados y como polvo en la matriz.</p> <p>Opacos: Fragmentos de cristales de minerales metálicos ocasionales dispersos, no oxidados.</p>	<p>Cuarzo: En mosaico microcristalino de color claro formando lentes orientados con una dimensión mayor paralela a subparalela marcando los efectos de la deformación en dominio dúctil. Por lo general incoloros de aspecto. Empolvado- sucio, tamaño muy fino, menor de 0,00125 mm. Al menos en parte es secundario.</p> <p>Material arcilloso: Producto de granulación. Fragmentación extrema constituido por arcillas que engloban lentes o flaser de cuarzo monocristalino, de color más oscuro que lo separa del resto del material en la roca.</p> <p>Opacos: Fragmentos de granos muy finos, dispersos de minerales metálicos no oxidados.</p> <p>Líticos: Corresponden a augen dispersos de la roca original producto probablemente por fragmentación y que caracterizan la textura dinámica que presenta la roca.</p> <p>Esfena: Como polvo de coloración oscura.</p>
	MATRIZ	Material arcilloso menor de 5 µ, de distribución homogénea, isotropo de coloración oscura por presencia de materia orgánica carbonosa sin evidencias claras de deformación mecánica y donde la estructura flaser puede haberse producido por compactación de material detritico más grueso con movimientos locales y diferenciales durante la compactación.		Material de tamaño limo arcilloso intergranular no continuo entre clastos de cuarzo – feldespato, distribución no uniforme
CLASIFICACIÓN		Toba de cristales	Protomilonita	Toba de cristales fina
ORIGEN		Volcánico Piroclástico	Metamorfismo dinámico	Volcánico Piroclástico
OBSERVACIONES		Estructura flaser producida por orientación dinámica en dominio dúctil.	Roca asociada a zona de falla.	

NUMERO DE MUESTRA		M-8	M-9	M-11
DESCRIPCIÓN MACROSCOPICA		Roca inequigranular, localmente con estructura augen con orientación del eje mayor de estos y plegados y en otras de granulometría homogénea color gris oscuro - negro (N2-N1), microvenillas paralelas y plegadas rellenas con cuarzo muy fino y en planos de fractura con lustre sedoso. Limolita	Roca compacta, masiva, isotropa de color gris medio – claro (N5) uniforme con ocasionales laminas gruesas paralelas gris oscuro (N2), Blanda, equigranular fina. Roca piroclastica con tamaño predominante ceniza fina.	Roca compacta isotropa de estructura clástica con fragmentos no orientados de distribución uniforme mal seleccionados, tamaño máximo 22 mm, color gris medio claro (N5), ocasionalmente fragmentos líticos de sedimentitas y de cuarzo lechoso . Roca volcánica piroclastica tamaño lapilli-ceniza.
DESCRIPCION MICROSCOPICA	CRISTALINIDAD			
	TEXTURA	Clástica	Clástica	Clastica
	ESTRUCTURA	Ligeramente Laminada		Masiva Compacta
COMPOSICION	MINERALES ESENCIALES	Cuarzo 30,05	Cuarzo 39,9 %	Cuarzo 43,1 % Plagioclasa 3,0 %
	MINERALES CARACTERIZANTES	Matriz 69,5%	Matriz 60,0 %	Matriz 18,0 %
	MINERALES ACCESORIOS	Opacos metálicos TR	Opacos 0,1 %	Líticos 35,0% Micas 1,0 %
	MINERALES SECUNDARIOS			Opacos 0,7%
DESCRIPCIÓN COMPOSICIONAL	FRAGMENTOS	<p>Cuarzo: Fragmentos tamaño limo muy fino, por lo general en agregados formando mosaicos muy finos separados por matriz arcillosa-carbonosa en conjunto orientados con disposición paralela a subparalela de flaser de cuarzo monocristalino entre material mas fino.</p> <p>Opacos: Granos o fragmentos de cristales diseminados de minerales metálicos.</p> <p>Materia carbonosa: En polvo de color negro de abundancia relativa diferente entre laminas y asociada a material arcilloso dándole la coloración negra que caracteriza la roca.</p>	<p>Cuarzo: Fragmentos de cristales como clastos aislados y formando lentes-Augen con textura en mosaico de granos en contactos completos y que en conjunto presentan una orientación definida por la disposición paralela a sub-paralela de los ejes mayores. Tamaño de los fragmentos en el rango de limo.</p> <p>Opacos: Granos finos a muy finos dispersos en toda la matriz de la roca, de minerales metálicos no oxidados.</p>	<p>Cuarzo: Fragmentos no seleccionados de tamaño arena fina a media, de tipo monocristalino formando mosaicos de granos en contactos completos continuos, incoloros empolvados por microinclusiones de opacos no deformados con extinción ondulatoria débil.</p> <p>Plagioclasa: Fragmentos de cristales incompletos de habito tabular con planos de macla según albita- Carlsbad no zonada, relieve moderado, composición intermedia. Cálcaica.</p> <p>Líticos: Fragmentos de rocas sedimentarias de tipo arenoso con fragmentos o clastos seleccionados tamaño limo con matriz arcillosa, corresponden a rocas clásticas de tipo areniscas finas – limolitas.</p> <p>Micas: Fragmentos de granos de minerales metálicos muy finos, dispersos ocasionales, no oxidados.</p>
	MATRIZ	Material arcilloso menor de 5 µ, de distribución homogénea, isotropo de coloración oscura por presencia de materia orgánica carbonosa sin evidencias claras de deformación mecánica y donde la estructura flaser puede haberse producido por compactación de material detritico más grueso con movimientos locales y diferenciales durante la compactación.	Arcillosa (Limo-arcillosa-carbonosa) en conjunto con laminación débil marcada por líneas más ricas en materia carbonosa que dan una coloración negra, además presenta acumulación local de la materia carbonosa, no continua. Materia carbonosa: En polvo de coloración oscura que da el color a la matriz, de distribución uniforme, homogénea.	Material de tamaño limo arcilloso intergranular no continuo entre clastos de cuarzo – feldespato, distribución no uniforme
CLASIFICACIÓN		Limolita Carbonosa	Limolita	Grawaca
ORIGEN		Sedimentario detritico	Sedimentario Detritico	Sedimentario detritico
OBSERVACIONES		Estructura Flaser Orientada		

ANEXO 2: Columna estratigráfica PS-PR-OD-01

PS-PR-OD-01			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
1046,0 0,00		4,50	<p>Depósito aluvial matriz soportado con relación de clastos/matriz 40%/60%. Los clastos de hasta 4 cm subangulares-subredondeados, están compuestos de arenisca, y la matriz es arenosa de color pardo.</p>
4,50		7,50	<p>Depósito aluvial matriz soportado con relación de clastos/matriz de 40%/60%, clastos de hasta 25 cm de arenisca, subredondeados mal seleccionados, matriz arenosa color gris oscuro.</p>
12,00		13,00	<p>Depósito aluvial matriz soportado con relación de matriz/clastos 95-5%, la matriz está formada por arenisca de grano medio y color gris oscuro y algunas gravas subangulares de arenisca</p>
25,00		5,50	<p>Depósito aluvial matriz soportado con relación matriz/clastos 80%/20%, una matriz arenosa de grano medio y color gris oscuro. Los clastos son fragmentos de arenisca de hasta 16 cm de diámetro.</p>
30,50			

ANEXO 3: Columna estratigráfica PS-PR-CM-01

PS-PR-CM-01			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
864,0		0,00 - 9,00	<p>Depósito Aluvial Matriz soportado Con relación clastos/matriz (35%/65%) Compuesto por clastos heterométricos de basalto, gabro y lutita, subangulares, mal seleccionados, en una matriz arenosa de tonalidad gris.</p>
855,0		9,00 - 12,00	<p>Depósito Aluvial Clasto soportado Con relación clastos/matriz (70%/30%). Compuesto por clastos heterométricos de basalto, gabro y lutita, subangulares, mal seleccionados, en una matriz limo-arenosa de tonalidad gris.</p>
852,0		12,00 - 24,70	<p>Basalto: De 12,00 m a 14,00 m se encuentra un horizonte de meteorización IIA, con resistencia a la compresión simple de R2. Expone cambios locales texturales a basalto porfídico con cristales de plagioclasa. De 14,00 m a 15,90 m, se encuentra un horizonte de meteorización IIB y resistencia R3, presenta un fracturamiento alto con presencia de venillas de cuarzo milimétricas en Stockwork que confieren planos de debilidad. De 15,90 m a 20,00 m, se encuentra un horizonte de meteorización IIB y resistencia R3 (25-50 MPa), se aprecia un fracturamiento alto de roca basalto color gris verdoso con cristales de plagioclasa y localmente con textura en stockwork con fracturamiento alto y oxidación en paredes.</p>
839,3		24,70 - 30,00	<p>Limolita carbonosa: Roca sedimentaria de color gris oscuro-negro (N2-N1) con venas irregulares de color blanco. Se encuentra en horizonte de meteorización IIB y resistencia a la compresión simple R2. Fracturamiento alto generando una matriz arenosa.</p>
834,0			

ANEXO 4: Columna estratigráfica PS-PR-CO-01

PS-PR-CO-01			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
1409,0 0,00		6,35	Depósito de vertiente matriz soportado con relación clastos/matriz 30%/70%, la matriz está formada por un material limo de color café pardo a amarillo ocre, se alcanzan a observar fragmentos de roca arenisca altamente meteorizada.
6,35		9,10	Depósito de vertiente clasto soportado con relación clastos/matriz 60%/40%, la matriz está formada por un material arenoso de color amarillo pardo, se alcanzan a observar fragmentos de roca arenisca altamente meteorizados.
15,45		10,65	Limolita de coloración uniforme (gris medio-claro N5) con ocasionales laminas gruesas paralelas gris oscuro (N2), raya fácilmente con la navaja, equigranular fina. En horizonte de meteorización IIA y resistencia R1. Posee alto grado de fracturamiento generando matriz arenosa.
26,10		13,70	Roca fracturada, sin estructura, generando material arenoso de grano fino de color gris oscuro, compuesto de cuarzo y relictos de roca. En ocasiones se observan remanentes de roca de diámetros menores a 3 cm pertenecientes porbablemente a Limolita
39,80		10,00	Limolita de coloración uniforme (gris medio-claro N5) con ocasionales laminas gruesas paralelas gris oscuro (N2), raya fácilmente con la navaja, equigranular fina. En horizonte de meteorización IIA y resistencia R1, fracturamiento alto. En algunos sectores se observa alteración de color verde oliva con textura vítrea.
49,80	4,10	Toba laminada con bandeamiento marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por franjas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2.	
53,90			

PS-PR-CO-01			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
53,90		11,60	Toba laminada con bandeamiento marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por franjas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2. Fracturamiento moderado a alto.
63,35		2,15	Roca fracturada, generando material arenoso de grano fino de color gris oscuro, compuesto de cuarzo remanentes de roca de diámetros menores a 3 cm pertenecientes probablemente a toba laminada
65,50		6,15	Toba de cristales compuesta de cuarzo, plagioclasa, epidota en una matriz de tonalidad oscura fina. Los cristales se encuentran elongados siguiendo la dirección de laminación presente en la roca. Se encuentra en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1
71,65		2,25	Protomilonita: Roca piroclástica laminada con bandas gris oscuras (N2-N1) y claras (gris medio N5) con auge dispersas en conjunto con débil orientación de color más claro. Horizonte de meteorización IIB y resistencia R3
73,90		6,60	Toba de cristales Roca de textura granular se observan cristales de cuarzo, plagioclasa, epidota. Algunos cristales se encuentran elongados presentando una orientación. Horizonte de meteorización IIB y resistencia R2 con fracturamiento moderado. Presencia de venas de cuarzo de 30cm
80,50		2,70	Toba laminada formado por laminas gris oscuro (N4) y por laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Horizonte de meteorización IIB y resistencia R2.
83,20		14,35	Toba de cristales: Roca compacta masiva isótropa de coloración uniforme gris claro, de naturaleza clástica no orientada ni laminada. Roca volcánica piroclástica de grano fino uniforme, en horizonte de meteorización IIB con resistencia R2-R3.
97,55		5,45	Toba de cristales Roca de textura granular rica en líticos oscuros, cuarzo y menor proporción plagioclasa, en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2. Se observa orientación de los cristales siguiendo la dirección de laminación.
103,00		2,45	Protomilonita: Roca con bandeamiento irregular marcado por cambios en la coloración de gris oscuro-negro (N2-N1) a gris medio (N4) en ocasionales venillas plegadas en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2
105,45		2,80	Toba laminada marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) y por laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Horizonte de meteorización IIB y resistencia R2
108,25			

PS-PR-CO-01			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
108,25	<p>Sulfuros</p> <p>buzamiento 35°</p> <p>buzamiento 35°</p>	10,10	Toba de cristales: Roca compacta masiva isótropa de coloración uniforme gris claro, de naturaleza clástica no orientada ni laminada. Roca volcánica piroclástica de grano fino uniforme, en horizonte de meteorización IIB con resistencia R2-R3.
118,35		2,65	Toba laminada formado por laminas gris medio-oscuro (N4) y laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Horizonte de meteorización IIB y resistencia R2.
121,00		3,90	Toba de cristales: Roca compacta masiva isótropa de coloración uniforme gris claro, de naturaleza clástica no orientada ni laminada. Roca volcánica piroclástica de grano fino uniforme, en horizonte de meteorización IIB con resistencia R2.
133,90		2,40	Toba laminada formado por laminas gris medio-oscuro (N4) y laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Horizonte de meteorización IIB y resistencia R1
136,30		3,60	Roca fracturada, sin estructura, generando matriz arenosa de grano fino de color gris oscuro. En ocasiones se observan remanentes de roca de diámetros menores a 3 cm pertenecientes posiblemente a toba laminada.
139,90			

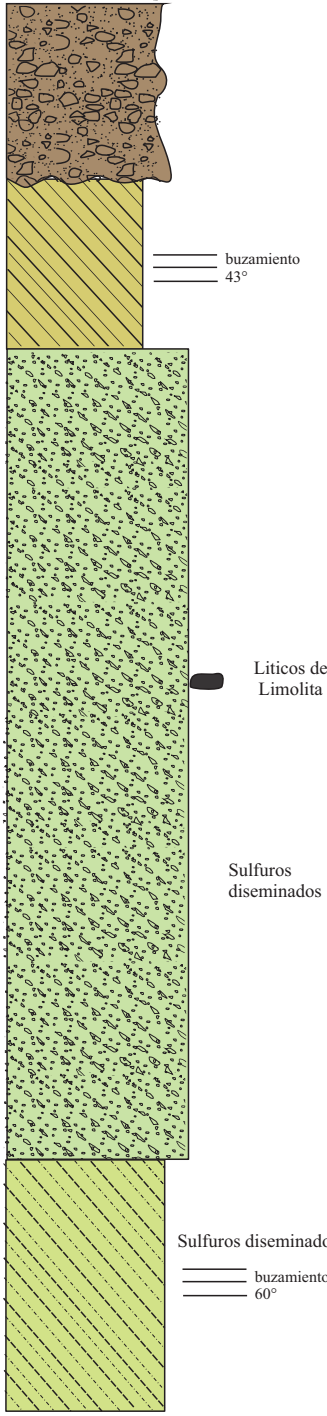
ANEXO 5: Columna estratigráfica PS-PR-CO-02

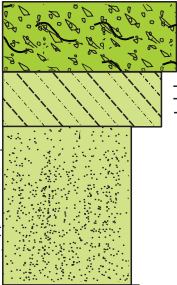
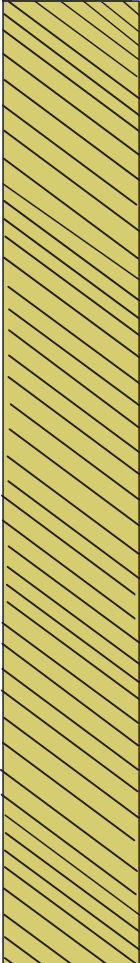

PS-PR-CO-02			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
-935,00 0,00 4,90 7,80		4,90	Depósito de vertiente matriz soportado con relación fragmentos/matriz de 35%/65% . La matriz está compuesta por material areno-limoso color pardo con variaciones a pardo oscuro. Los fragmentos se componen de roca arenisca con diámetros de hasta 10 centímetros.
7,80		2,90	Depósito de vertiente clasto soportado compuesto de fragmentos de arenisca, con relación fragmentos/matriz del 80%/20%. La matriz se de material arcilloso color pardo
27,70		19,90	Depósito de vertiente matriz soportado , con relacion fragmentos/matriz de 30%/70%. Los clastos son de arenisca con diámetros de hasta 10 cm y la matriz está constituida por un material limoarenoso de color pardo oscuro.
41,20		13,50	Depósito de vertiente matriz soportado , con relacion fragmentos/matriz de 30%/70%. Los clastos son de arenisca con diámetros de hasta 10 cm y la matriz está constituida por un material limoarenoso de color pardo oscuro.
46,45		5,25	Grauvaca Lítica: Roca compacta isótropa de estructura clástica con fragmentos no orientados de distribución uniforme mal seleccionados, tamaño máximo 22 mm, color gris medio claro (N5), ocasionalmente fragmentos líticos de sedimentitas y de cuarzo lechoso, en horizonte de meteorización IIA, fracturamiento alto y resistencia R2.
50,80		4,35	Limolita carbonosa: Roca sedimentaria de color gris oscuro-negro (N2-N1), fracturamiento alto perdiendo la estructura original de la roca, con resistencia R1 en horizonte de meteorización IIB.

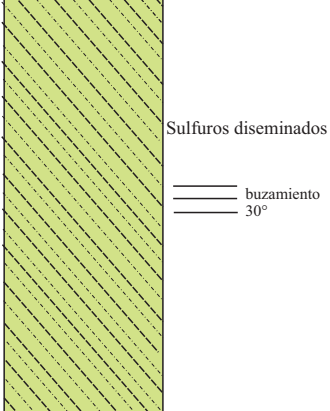
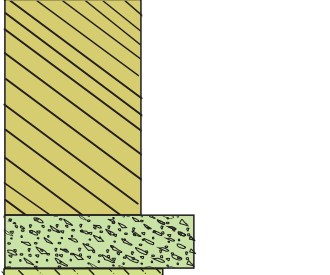
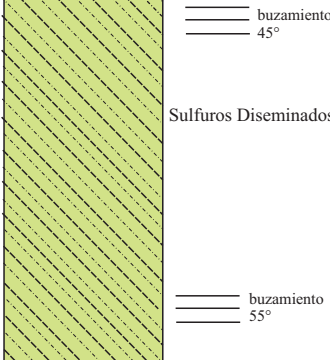
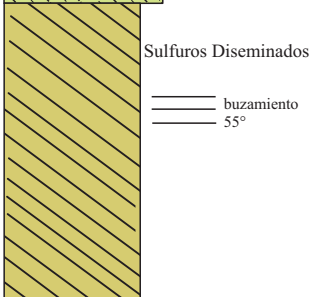
ANEXO 6: Columna estratigráfica PS-PR-CO-03

PS-PR-CO-03				
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción	
1094,0 00,0 3,90 11,70 22,00		3,90 7,80 10,30	<p>Depósito de vertiente matriz soportado, relación clastos/matriz 40%/60%. La matriz es de composición limosa de color amarillo ocre y los clastos de hasta 6cm de arenisca.</p> <p>Depósito de vertiente matriz soportado, relación clastos/matriz 30%/70%. La matriz es de composición limosa de color amarillo ocre y los clastos de roca arenisca</p> <p>Depósito de vertiente matriz soportado, relación clastos/matriz 40%/60%. La matriz esta formada por un material limo arenoso de color amarillo ocre y los clastos de hasta 6cm de roca arenisca.</p>	
47,50 51,50 59,50 60,50			25,50 4,00 8,00 1,0	<p>Roca laminada con bandeamiento milimétrico marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Fracturamiento alto y superficies de oxidación.</p> <p>Toba de cristales de textura granular con cristales de plagioclasa y cuarzo elongados y siguiendo la dirección de laminación presente en la sección. Roca en horizonte de meteorización IIB y resistencia R1.</p> <p>Limolita carbonosa: Localmente con estructura augen, granulometría homogénea color gris oscuro- negro (N2-N1), microvenillas paralelas y plegadas rellenas con cuarzo muy fino y en planos de fractura con lustre sedoso en horizonte de meteorización IIB y resistencia R1.</p> <p>Toba de cristales compuesta de plagioclasa y cuarzo en una matriz afanítica de tonalidad gris oscuro. Los cristales están elongados y siguiendo la dirección de laminación, en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2.</p>

ANEXO 7: Columna estratigráfica PS-PR-CO-04

PS-PR-CO-04			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
1243,0 0,00	 <div style="position: absolute; top: 340px; left: 310px; font-size: small;"> = = = = = buzamiento 43° </div> <div style="position: absolute; top: 535px; left: 365px; font-size: small;"> ● Líticos de Limolita </div> <div style="position: absolute; top: 630px; left: 350px; font-size: small;"> Sulfuros diseminados </div> <div style="position: absolute; top: 805px; left: 320px; font-size: small;"> Sulfuros diseminados = = = = = buzamiento 60° </div>	10,00	Suelo residual compuesto por un material limoarenoso de color pardo se observan fragmentos, se observan fragmentos altamente meteorizados de hasta 10 cm de diámetro
10,00 19,00		9,00	Limolita con laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5), Con presencia de sulfuros (pirita) presentando alto fracturamiento y resistencia R2.
19,00 61,90		42,,90	Toba de cristales formada por cristales de cuarzo, plagioclasa, presencia de carbonatos, en la matriz de tonalidad gris claro, se observan niveles milimétricos de gris oscuro (N2) equigranulares. Fracturamiento moderado con resistencia R3 (25-50 Mpa) en horizonte de meteorización IIB. Se observa pirita diseminada en un 1 % (pirita y calcopirita). Se observan aleatoriamente venas de cuarzo de hasta 5 cm
61,90 75,25		13,65	Toba laminada con bandeamiento milimétrico marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. En horizonte de meteorización IIB, con fracturamiento moderado y resistencia R3.

PS-PR-CO-04			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
75,25	 <p>buzamiento 45°</p>	3,7	Protomilonita: Roca con bandeamiento irregular marcado por cambios en la coloración de gris oscuro-negro (N2-N1) a gris medio (N4) en ocasionales venillas plegadas en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2
78,95		2,9	Toba laminada con laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5), finogranular clásica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. En horizonte de meteorización IIB, con fracturamiento moderado y resistencia R3.
81,85		8,5	Por el alto grado de fracturamiento no se observa estructura de la roca generando una matriz arenosa de tonalidad gris oscuro se encuentran remanentes de toba laminada se encuentra en horizonte de meteorización IIB .
90,35	 <p>Sulfuros diseminados</p> <p>buzamiento 55°</p>	51,15	Limolita compacta isótropa de coloración uniforme (gris medio-claro N5) con ocasionales laminas gruesas paralelas gris oscuro (N2), raya fácilmente con la navaja, equigranular fina. Se encuentra en horizonte de meteorización IIB, con fracturamiento alto y resistencia R1 - R2.
141,50		11,10	Protomilonita laminada con bandas finas gris oscuras-negras (N2-N1) y claras (gris medio N5) con micro augen dispersas en conjunto con débil orientación, en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2
152,60	 <p>buzamiento 30°</p>		

PS-PR-CO-04			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
152,60		21,90	Toba laminada de tonalidad gris medio-oscuro (N1-N2) intercalada con laminas gruesas gris medio-claro (N5) con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos.
174,50		5,80	Roca muy fracturada formando matriz arenosa de tonalidad gris oscuro con remanentes de roca, posiblemente toba laminada en horizonte de meteorización IIB y resistencia S1.
180,30		11,40	Limolita carbonosa de color gris oscuro-negro (N2-N1), se observa localmente estructura augen, con venas irregulares de color blanco, plegadas y mineralizadas de sulfuros (Pirita-calcopirita), en horizonte de meteorización IIB, resistencia R2 y fracturamiento alto.
191,70		2,80	Toba de cristales con cristales de cuarzo y plagioclasa formando estructura micro augen dispersas en conjunto con débil orientación en una matriz de tonalidad gris oscuro (N1-N2), en horizonte IIB, con resistencia R3 y fracturamiento moderado
194,50		19,60	Toba laminada con bandeamiento milimétrico marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos en horizonte de meteorización IIB, resistencia R2, fracturamiento moderado a alto, se encuentra presencia de venas de cuarzo milimétricas
214,10		11,65	Limolita de coloración uniforme gris medio-claro (N5) con ocasionales laminas gruesas paralelas gris oscuro (N2) equigranular, horizonte IIB y resistencia R2, fracturamiento alto; venas de cuarzo menores a 1 cm.
230,00			

ANEXO 8: Columna estratigráfica PS-PR-CO-05

PS-PR-CO-05			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
0,00		7,55	<p>Depósito de vertiente clasto-soportado con relación clastos-matriz del 80%/20%, la matriz esta formada por un material limo-arcilloso de color amarillo pardo. Los clastos son fragmentos de roca arenisca.</p>
7,55		14,95	<p>Depósito de vertiente clasto-soportado con relación clastos/matriz del 65%/35%, la matriz esta formada por un material limo-arenoso de color amarillo ocre. Los clastos son fragmentos de roca arenisca.</p>
22,50		9,70	<p>Toba de cristales compacta con constituyentes clásticos(¿) no orientados y de distribución uniforme, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1, presenta un fracturamiento alto</p>
32,20		4,10	<p>Toba laminada con banda gris medio-oscuro (N4) y laminas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Presenta un fracturamiento alto, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1.</p>
36,30		10,45	<p>Protomilonita con fragmentos tamaño ceniza de cristales, con venas blancas irregulares en distribución y espesor, algunas caracterizadas por y algunos lentes de cuarzo lechoso limpio. En general presenta una estructura fragmentada con ligera orientación y laminación. Se encuentra en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1.</p>
46,75		3,25	<p>Protomilonita con estructura augen, con orientación de los fragmentos y una laminación débil marcada por cambio de color gris medio (N4) a gris oscuro-negro (N2-N1).Se encuentra en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2.</p>
60,00	<p style="text-align: right;">pliegues ptigmaticos</p>		

ANEXO 9: Columna estratigráfica PS-PR-CO-06

PS-PR-CO-06			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
-1634,00 0,00		2,40	Suelo residual compuesto por un material limo de color café pardo a amarillo ocre, observan fragmentos de roca altamente meteorizados.
2,40		6,60	Toba laminada con bandeamiento milimétrico marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5) en horizonte de meteorización IC con remanentes de roca hasta un 10 %. La parte fina está compuesta por un material arcilloso color pardo y de consistencia friable a dura.
9,00		9,60	Toba de cristales en horizonte de meteorización IIA con resistencia R3 (25 - 50 Mpa). Compuesta por cristales de cuarzo y plagioclasa, fenocristales de cuarzo anhedrales en una matriz fina de tonalidad oscura. Fracturamiento alto. Se observan localmente venillas de cuarzo de hasta 0,5 cm
18,60		13,80	Roca laminada con bandeamiento centimétrico marcado por laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5) en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2 con alto fracturamiento y sin evidencias de indicadores cinemáticos que denoten efectos dinámicos. Se observa presencia de suelo entre 27,30 m y 29,10 m. No se recupero en el tramo 29,10 - 29,40 m.
32,40		10,10	Toba de cristales formada por cristales de cuarzo, plagioclasa, se identificaron algunos niveles milimétricos de roca fina, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2(5-25Mpa), se observa material arcilloso color pardo-amarillento. Fracturamiento alto.
42,50		1,60	Roca fracturada, sin estructura, generando material arenoso de grano fino de color gris oscuro, compuesto de cuarzo y relictos de roca de hasta 3 cm.
44,10		5,10	Toba lítica compuesta de cristales de cuarzo, plagioclasa, líticos de roca basáltica y pómez, se muestra en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2 - R1. Fracturamiento alto.
49,20		5,30	Toba de cristales compacta masiva isótropa de coloración uniforme gris claro, de naturaleza clástica no orientada ni laminada, de grano fino uniforme. En horizonte de meteorización IIA y resistencia R2. Presenta paredes de oxidación y fracturamiento alto.
54,50		3,05	Toba lítica compuesta de cristales de cuarzo, plagioclasa, líticos de roca basáltica y pómez, se muestra en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2 - R1. Fracturamiento alto..
57,55			

PS-PR-CO-06			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
57,55		5,65	Limolita carbonosa de tonalidad gris oscuro-negro (N2-N1), muy fracturada, generando un material arenoso. Horizonte de meteorización IIA y resistencia R0
63,20		7,25	Toba laminada con bandeamiento marcado por franjas gris medio-oscuro (N4) separadas por franjas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. En horizonte de meteorización IIB y resistencia R2 con alto fracturamiento y generando matriz arenosa.
70,45		6,15	Protomilonita laminada con bandas finas gris oscuras-negras (N2-N1) y claras (gris medio N5) con micro augen dispersas en conjunto con débil orientación de color más claro, en horizonte de meteorización IIB, fracturamiento alto y resistencia R2.
76,60		8,40	Toba de cristales compacta con fracturas milimétricas de distribución irregular y microvenillas no continuas, localmente con apariencia bandeada, isótropa de color gris medio claro. Presenta fracturamiento alto en horizonte de meteorización IIB y Resistencia R2.
85,00		3,30	Limolita carbonosa de tonalidad gris oscuro-negro (N2-N1), muy fracturada, generando un material arenoso. Horizonte de meteorización IIB y resistencia R0
88,30		4,90	Protomilonita laminada con bandas finas gris oscuras-negras (N2-N1) y claras (gris medio N5) con micro augen dispersas en conjunto con débil orientación de color más claro. Presenta cristales de plagioclasa, cuarzo, en horizonte de meteorización IIB y resistencia R1. <u>Fracturamiento alto.</u>
93,20		5,25	Toba laminada bandeamiento marcado por franjas gris medio-oscuro (N4) separadas por franjas gris medio-claro (N5), finogranular clástica con fragmentos menores de 2 mm de cristales y líticos volcánicos. Se presenta en horizonte de meteorización IIB con resistencia R1 hasta los 96,90 m, después prosigue hasta el final en horizonte de meteorización IIB y resistencia R2.
98,45		11,55	Protomilonita laminada con bandas finas gris oscuras-negras (N2-N1) y claras (gris medio N5) con micro augen dispersas en conjunto con débil orientación de color más claro, en horizonte de meteorización IIB, fracturamiento alto y resistencia R2.
110,00			

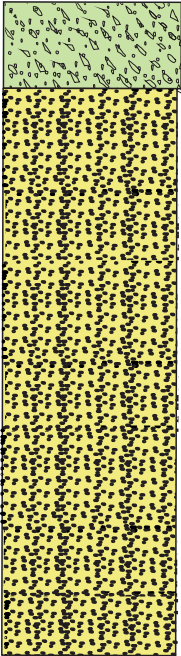
ANEXO 10: Columna estratigráfica PS-PR-CO-07

PS-PR-CO-07			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
-1568,00 0,00		10,00	Depósito de vertiente clasto soportado con relación clastos/matriz del 70%/30%, la matriz esta compuesta por un material limoso de tonalidad amarillo pardo, los clastos son de hasta 5 cm meteorizados y subredondeados..
10,00		4,50	Depósito de vertiente clasto soportado con relación clastos/matriz del 90%/10%, la matriz esta compuesta por un material arenoso de tonalidad amarillo pardo, los clastos son angulosos de hasta 15 cm de arenisca moderadamente meteorizados.
14,50		3,70	Depósito de vertiente matriz soportado con relación clastos/matriz del 35%/65%, la matriz esta compuesta por un material arenoso de tonalidad amarillo ocre, los clastos son de hasta 4 cm altamente meteorizados de arenisca y lutita
18,20		8,30	Depósito de vertiente clasto soportado con relación clastos/matriz del 90%/10%, la matriz esta compuesta por un material arenoso de tonalidad amarillo pardo, los clastos son angulosos de hasta 15 cm de arenisca y basalto moderadamente meteorizados.
26,50		3,00	Depósito de vertiente matriz soportado con relación clastos/matriz del 40%/60%, la matriz esta compuesta por un material arenoso de tonalidad amarillo pardo, los clastos son de hasta 4 cm altamente meteorizados.
29,50		6,00	Roca limolita en horizonte de meteorización IC con remanentes de roca hasta un 10 %. La parte fina está compuesta por un material arcilloso color pardo y de consistencia friable a dura.
25,50		12,00	Toba de cristales en horizonte de meteorización IC se encuentra fragmentos de roca toba de grano fino meteorizados de hasta 6 cm, y una matriz arenosa de tonalidad gris claro.
47,50			

ANEXO 11: Columna estratigráfica PS-PR-CO-08

PS-PR-CO-08			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
-1030,00 0,00		6,50	Depósito de vertiente clasto-soportado con relación fragmentos/matriz del 60%/40%. Matriz compuesta por un material arcilloso de color pardo-amarillo, clastos de roca arenisca altamente meteorizados.
6,50		13,50	Depósito de vertiente clasto-soportado con relación fragmentos/matriz del 70%/30%. Matriz formada por un material arenoso de color pardo-amarillo, clastos de roca toba altamente meteorizados.
20,00		7,00	Roca completamente fracturada de color gris oscuro, sin estructura formando una matriz arenosa de grano medio.
27,00 29,00		2,00	Toba de cristales con cristales de color blanco formando estructura augen dispersas en conjunto con débil orientación en una matriz de tonalidad gris oscuro, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1.
43,50		14,50	Roca completamente fracturada de color gris oscuro, sin estructura formando una matriz arenosa de grano medio.
53,00		9,0	Toba de cristales con cristales de color blanco formando estructura micro augen dispersas en conjunto con débil orientación en una matriz de tonalidad gris oscuro (N1-N2), en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1. Se observan venas de cuarzo.
65,00		11,40	Roca completamente fracturada de color gris oscuro, sin estructura formando una matriz arenosa de grano medio.

PS-PR-CO-08			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
65,00		8,00	Toba de cristales compuesta de cristales de cuarzo y plagioclasa en una matriz de tonalidad Gris oscuro (N2), con micro augen dispersas en conjunto con débil orientación. En horizonte de meteorización IIA y resistencia R1. en algunos tramos se observa la roca con mayor grado de meteorización. Presenta paredes de oxidación y un fracturamiento alto.
73,00 74,50		1,50	Toba laminada con laminas gris medio-oscuro (N4) separadas por laminas gris medio-claro (N5), finogranular clásica, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R2.
100,00		25,50	Toba de cristales compuesta de cristales de cuarzo y plagioclasa en una matriz de tonalidad Gris oscuro (N2), con micro augen dispersas en conjunto con débil orientación. en horizonte de meteorización IIA, resistencia R2 y fracturamiento alto.
123,70		23,70	Grauvaca litica con fragmentos no orientados de distribución uniforme mal seleccionados, tamaño máximo 22 mm, color gris medio claro (N5), ocasionalmente fragmentos líticos de sedimentitas y de cuarzo lechoso, fracturamiento alto, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R3

PS-PR-CO-08			
Profundidad (m)	Columna	Espesor (m)	Descripción
123,70 —		3,80	Toba de cristales expone franjas de tonalidad gris oscuro y de oxidación generando un bandeamiento irregular. Presenta cristales de cuarzo y de oxidación, en horizonte de meteorización IIA y resistencia R1
127,50 —		22,50	Grauvaca Litica con fragmentos no orientados de distribución uniforme mal seleccionados, tamaño máximo 22 mm, color gris medio claro (N5), ocasionalmente fragmentos líticos de sedimentitas y de cuarzo lechoso. La mayoría de sus cristales y clastos están alterados por meteorización. Se encuentra en un horizonte de meteorización IIA y resistencia R1-R2.
150,00 —			