

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA MODIFICACIÓN DE LA LICENCIA AMBIENTAL TÍTULO MINERO 745



CAPÍTULO 5.1. MEDIO ABIÓTICO

Rev. 0

Noviembre 2021

INGETEC
INGENIERÍA & DISEÑO

TABLA DE CONTENIDO

5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1. MEDIO ABIÓTICO

5.1.1. Geología.

5.1.1.1. Geología regional.

5.1.1.1.1. Marco Tectónico Regional

5.1.1.1.2. Estratigrafía

5.1.1.1.2.1. Triásico.

5.1.1.1.2.2. Jurásico.

5.1.1.1.2.3. Neógeno

5.1.1.1.2.4. Cuaternario.

5.1.1.2. Geología del Yacimiento título minero 745

5.1.1.2.1. Trabajos de exploración geológica del subsuelo

5.1.1.2.2. Estratigrafía del yacimiento

5.1.1.2.2.1. Cuaternario

5.1.1.2.2.2. Neógeno

5.1.1.2.2.3. Triásico

5.1.1.2.3. Geología estructural.

5.1.1.2.4. Geoquímica del yacimiento de arenas puzolánicas TM 745

5.1.2. Geomorfología.

5.1.2.1. Unidades morfogenéticas.

5.1.2.1.1. Ambiente morfoestructural.

5.1.2.1.1.1. Relieve colinado

5.1.2.1.1.2. Relieve de lomeríos

5.1.2.1.2. Ambiente fluvial

5.1.2.1.2.1. Relieve Terraza aluvial antigua (Ftas)

5.1.2.1.2.2. Escarpes de terrazas erosivos (Fte)

5.1.2.2. Morfografía.

5.1.2.3. Análisis Patrón de Drenaje.

- 5.1.2.4. Morfodinámica.
- 5.1.3. Amenazas geológicas
 - 5.1.3.1. Amenaza Volcánica
 - 5.1.3.2. Amenaza sísmica
 - 5.1.3.3. Amenaza por procesos de remoción en masa
- 5.1.4. Paisaje.
 - 5.1.4.1. Atributos del paisaje
 - 5.1.4.1.1. Elementos físicos del paisaje: relieve
 - 5.1.4.1.2. Elementos físicos del paisaje: cursos o láminas de agua
 - 5.1.4.1.3. Elementos bióticos del paisaje: vegetación y fauna (coberturas de la tierra)
 - 5.1.4.1.4. Elementos antrópicos del paisaje: infraestructura
 - 5.1.4.2. Unidades del paisaje
 - 5.1.4.2.1. Calidad visual
 - 5.1.4.2.2. Fragilidad visual
 - 5.1.4.2.3. Belleza paisajística
 - 5.1.4.2.4. Unidades de paisaje
 - 5.1.4.3. Visibilidad del paisaje
 - 5.1.4.4. Tamaño de la discordancia
 - 5.1.4.5. Sitios de interés paisajístico
 - 5.1.4.6. Percepción de las comunidades como referente de su entorno físico en términos culturales
 - 5.1.4.7. Descripción del proyecto dentro del componente paisajístico de la zona.
 - 5.1.5. Suelos y Uso de la tierra.
 - 5.1.5.1. Unidades de suelos.
 - 5.1.5.2. Unidades geomorfológicas
 - 5.1.5.3. Unidades cartográficas de suelos
 - 5.1.5.3.1. Consociación Ustic Haplustepts. Símbolo MWC, perfil 4
 - 5.1.5.3.2. Consociación Typic Ustorthents. Símbolo MWD, perfil 3
 - 5.1.5.3.3. Asociación Typic Ustorthents y Typic Haplustalfs. Símbolo PWH, Perfiles 1 y 2
 - 5.1.5.4. Clasificación agrológica y uso potencial
 - 5.1.5.5. Uso actual

5.1.5.6. Conflictos de uso del suelo

5.1.5.7. Usos de los suelos con respecto al ordenamiento territorial.

5.1.6. Hidrología.

5.1.6.1. Caracterización hidrológica

5.1.6.1.1. Localización del proyecto en la zonificación nacional

5.1.6.2. Identificación de sistemas lénticos y lóticos

5.1.6.3. Caracterización morfométrica

5.1.6.4. Patrón de drenaje

5.1.6.5. Caracterización de la precipitación

5.1.6.5.1. Análisis de consistencia y homogeneidad

5.1.6.5.2. Curvas de doble masa de precipitación

5.1.6.5.3. Identificación de Outliers

5.1.6.5.4. Complementación de vacíos

5.1.6.5.5. Variabilidad temporal de la precipitación

5.1.6.5.6. Variabilidad espacial de la precipitación

5.1.6.5.7. Temperatura

5.1.6.6. Caracterización hidrológica de los sistemas lóticos

5.1.6.6.1. Caudales medios

5.1.6.6.2. Caudales en los cuerpos de agua de interés

5.1.6.6.2.1. Análisis de tendencia

5.1.6.6.2.2. Curva de duración de caudales

5.1.6.6.2.3. Balance hídrico

5.1.6.6.2.4. Precipitación media mensual (P)

5.1.6.6.2.5. Evapotranspiración potencial (ETP)

5.1.6.6.2.6. Escorrentía mensual en las subcuencas en estudio

5.1.6.6.2.7. Diferencia entre Precipitación (P), Evapotranspiración (ETP) y Escorrentía (E)

5.1.6.6.2.8. Almacenamiento del suelo (R)

5.1.6.6.2.9. Capacidad máxima de almacenamiento

5.1.6.6.2.10. Almacenamiento en el balance hídrico

5.1.6.6.2.11. Infiltración (I)

- 5.1.6.6.2.12. Utilización de almacenamiento (UA)
- 5.1.6.6.2.13. Déficit de agua (D)
- 5.1.6.6.2.14. Evapotranspiración Real (ETR)
- 5.1.6.6.2.15. Resultados del balance hídrico
- 5.1.6.6.3. Caudales máximos
 - 5.1.6.6.3.1. Método del hidrograma unitario del SCS
 - 5.1.6.6.3.2. Resultados
- 5.1.6.6.4. Caudales mínimos
- 5.1.6.6.5. Caudales del río Coello
 - 5.1.6.6.5.1. Curva de duración de caudales
 - 5.1.6.6.6. Índices de caracterización del régimen hidrológico
- 5.1.6.7. Calidad del agua.
 - 5.1.6.7.1. Marco normativo
 - 5.1.6.7.1.1. Decreto 1076 de 2015
 - 5.1.6.7.1.2. Resolución 631 de 2015
 - 5.1.6.7.2. Metodología
 - 5.1.6.7.3. Puntos de monitoreo
 - 5.1.6.7.4. Resultados
 - 5.1.6.7.4.1. Época seca
 - 5.1.6.7.4.2. Época de lluvias
- 5.1.6.8. Usos del agua.
 - 5.1.6.8.1. Identificación de usos y usuarios del agua
 - 5.1.6.8.1.1. Identificación de usos actuales y proyectados
 - 5.1.6.8.1.2. Identificación de usuarios en cuerpos susceptibles a intervención
 - 5.1.6.8.1.3. Identificación de usos en el área de influencia
- 5.1.7. Hidrogeología.
 - 5.1.7.1. Evaluación geológica/geofísica.
 - 5.1.7.1.1. Triásico
 - 5.1.7.1.1.1. Formación Payandé (Trp).
 - 5.1.7.1.2. Jurásico

- 5.1.7.1.2.1. Stock de Payandé (Jgp).
- 5.1.7.1.3. Terciario
- 5.1.7.1.4. 5.1.7.1.3.1.Grupo Honda (Tsh).
- 5.1.7.1.5. Depósito de Caliche (Tsc).
- 5.1.7.1.6. Cuaternario - Pleistoceno.
- 5.1.7.1.6.1. Abanico de Guamo (Qag)
- 5.1.7.1.7. Cuaternario - Holoceno.
- 5.1.7.1.7.1. Aluvial reciente (Qal)
- 5.1.7.2. Evaluación Hidráulica.
- 5.1.7.2.1. Condiciones litológico-estructurales relacionadas a la hidráulica.
- 5.1.7.2.1.1. Acuíferos discontinuos de extensión regional y local con moderada productividad.
- 5.1.7.2.1.2. Rocas Fisuradas o Sedimentos con Limitados Recursos de Agua Subterránea.
- 5.1.7.2.2. Geometría del sistema acuífero.
- 5.1.7.2.3. Superficie piezométrica.
- 5.1.7.2.4. Balance del acuífero.
- 5.1.7.2.4.1. Recarga por Infiltración de Agua de Lluvia.
- 5.1.7.2.4.2. Precipitación que Infiltra (Pi).
- 5.1.7.2.4.3. Agua Disponible (AgD).
- 5.1.7.2.4.4. Humedad Disponible (Hd).
- 5.1.7.2.4.5. Recarga al Acuífero (IRp).
- 5.1.7.2.4.6. Volúmenes de Agua Involucrados en el Tajo La Esmeralda.
- 5.1.7.3. Inventario Puntos de Agua Subterránea
- 5.1.7.4. Evaluación Hidrogeoquímica e Isotópica - Resultados Modelo Wes.
- 5.1.7.4.1. Monitoreo de aguas subterráneas y superficiales.
- 5.1.7.4.1.1. Aguas subterráneas.
- 5.1.7.4.2. Metodologías aplicadas
- 5.1.7.4.2.1. Muestreo y monitoreo en campo.
- 5.1.7.4.2.2. Parámetros fisicoquímicos de campo.
- 5.1.7.4.2.3. Parámetros de laboratorio
- 5.1.7.4.2.4. Control de calidad (Qa/Qc)

5.1.7.4.3. Resultados de la hidroquímica de las aguas subterráneas y superficiales.

5.1.7.4.3.1. Quebradas Aguirre y Chicalá.

5.1.7.4.3.2. Piezómetros PZM3 y PZM5.

5.1.7.4.3.3. Filtraciones en el pit de calizas

5.1.7.4.3.4. Sumideros del tajo y drenaje El Salado

5.1.7.4.4. Resultados de la isotopía

5.1.7.4.4.1. Registro y contexto de análisis anteriores

5.1.7.4.4.2. Metodología usada para el análisis isotópico

5.1.7.4.4.3. Valores isotópicos en el área de estudio mina La Esmeralda

5.1.7.4.4.4. Consideraciones a la isotopía INGETEC

5.1.7.5. Evaluación Hidrogeoquímica e Isotópica - Resultados Análisis Ingetec.

5.1.7.5.1. Calidad del agua

5.1.7.5.2. Composición hidrogeoquímica

5.1.7.5.2.1. Balance iónico

5.1.7.5.2.2. Clasificación por iones dominantes

5.1.7.6. Resultados del Modelo Hidrogeológico Conceptual.

5.1.7.7. Modelo numérico del flujo de las aguas subterráneas.

5.1.7.7.1. Estructura del modelo numérico

5.1.7.7.2. Dominio de la modelación y malla

5.1.7.7.3. Zonas de permeabilidad

5.1.7.7.4. Zonas de recarga potencial

5.1.7.7.5. Condiciones de contorno

5.1.7.7.5.1. Río Coello.

5.1.7.7.5.2. Quebrada Chicalá y drenaje Estacional El Salado.

5.1.7.7.5.3. Conexión entre el área de estudio con el acuífero regional.

5.1.7.7.5.4. Pozos de observación.

5.1.7.7.6. Resultados y discusión del modelo en estado estacionario.

5.1.7.7.7. Simulaciones numéricas predictivas

5.1.7.7.7.1. Expansión del tajo hacia áreas A1, A2 y A3.

5.1.7.7.7.2. Expansión de las zonas de sobrantes de excavación minera.

- 5.1.7.7.3. Infiltración de la quebrada Chicalá.
- 5.1.8. Geotecnia.
 - 5.1.8.1. Información de referencia
 - 5.1.8.2. Sismicidad de la zona del proyecto.
 - 5.1.8.3. Exploración Geotécnica
 - 5.1.8.4. Caracterización geotécnica.
 - 5.1.8.4.1. Criterios de falla
 - 5.1.8.4.2. Propiedades geotécnicas de los materiales de la zona de estudio
 - 5.1.8.4.2.1. Parámetros geotécnicos adoptados
 - 5.1.8.5. Criterios para la evaluación de la estabilidad de las obras
 - 5.1.8.5.1. Mecanismos de falla considerados y métodos de análisis
 - 5.1.8.5.2. Nivel de agua sub-superficial.
 - 5.1.8.5.3. Coeficiente de aceleración sísmica
 - 5.1.8.5.4. Criterios para la Evaluación de la Amenaza
 - 5.1.8.5.5. Criterios para la zonificación geotécnica
 - 5.1.8.5.5.1. Metodología para la evaluación de susceptibilidad ante procesos morfodinámicos
 - 5.1.8.6. Procesos de inestabilidad identificados en el área de estudio
 - 5.1.8.7. Evaluación de estabilidad para los trabajos de operación minera
 - 5.1.8.7.1. Análisis estabilidad falla general por corte taludes Pit Minero del título 745
 - 5.1.8.7.2. Análisis de estabilidad Escombreras de la mina La Esmeralda
 - 5.1.8.8. Evaluación de la Amenaza
 - 5.1.8.9. Conformación de Taludes
 - 5.1.8.10. Monitoreo Geotécnico
 - 5.1.8.10.1. Inspecciones Visuales de los Taludes por Parte de Personal Capacitado
 - 5.1.8.10.2. Puntos de Control Topográfico - Prismas
 - 5.1.8.10.3. Piezómetros
 - 5.1.8.10.4. Inclínómetros
 - 5.1.8.11. Componente Geotécnico etapas de cierre y post cierre.
- 5.1.9. Atmósfera.
 - 5.1.9.1. Meteorología.

5.1.9.1.1. Análisis de consistencia y homogeneidad estaciones hidroclimatológicas.

5.1.9.1.1.1. Boxplot

5.1.9.1.1.2. Test de Walsh

5.1.9.1.2. Temperatura

5.1.9.1.2.1. Temperatura media

5.1.9.1.2.2. Temperatura mínima

5.1.9.1.2.3. Temperatura máxima

5.1.9.1.3. Humedad relativa

5.1.9.1.4. Brillo Solar

5.1.9.1.5. Evaporación

5.1.9.1.6. Presión atmosférica

5.1.9.1.7. Viento

5.1.9.2. Fuentes de emisión

5.1.9.2.1. Inventarios de fuentes de emisión de la visita técnica

5.1.9.2.2. Aforos vehiculares

5.1.9.2.2.1. Resultados Vía 1

5.1.9.2.2.2. Resultados Vía 2

5.1.9.2.3. Inventario de receptores sensibles

5.1.9.2.4. Estimación de la emisión atmosférica.

5.1.9.3. Calidad del aire.

5.1.9.3.1. Localización de puntos de monitoreo

5.1.9.3.2. Metodología

5.1.9.3.3. Normatividad

5.1.9.3.4. Resultados de calidad de aire

5.1.9.3.4.1. Informe cuatrimestral de calidad de aire nov 2017 a feb 2018

5.1.9.3.4.2. Informe cuatrimestral de calidad de aire marzo a junio 2018

5.1.9.3.4.3. Estudio de calidad de aire planta caracolito P-795

5.1.9.3.4.4. Informe de estudio especial de calidad de aire en la mina de caliza la Esmeralda

5.1.9.3.4.5. Monitoreo año 2020

5.1.9.3.4.6. Monitoreo año 2021

5.1.9.3.5. Conclusiones calidad de aire

5.1.9.4. Modelación de la Calidad del aire.

5.1.9.5. Ruido y vibración.

5.1.9.5.1. Inventario de fuentes de generación de ruido.

5.1.9.5.2. Monitoreos de ruido

5.1.9.5.2.1. Puntos de monitoreo campaña 2019

5.1.9.5.2.2. Normatividad

5.1.9.5.2.3. Procedimiento de medición de ruido

5.1.9.5.2.4. Análisis de la estimación de la incertidumbre en los métodos de medición de ruido

5.1.9.5.2.5. Equipos utilizados para la medición

5.1.9.5.2.6. Resultados de las mediciones de los niveles de ruido

5.1.9.5.2.7. Puntos de monitoreo campaña 2020

5.1.9.5.2.8. Normatividad

5.1.9.5.2.9. Procedimientos de medición de ruido

5.1.9.5.2.10. Análisis de la estimación de la incertidumbre en los métodos de medición de ruido

5.1.9.5.2.11. Equipos utilizados para la medición

5.1.9.5.2.12. Verificación y calibración de equipos

5.1.9.5.2.13. Resultados de las mediciones de los niveles de ruido ambiental

5.1.9.5.3. Vibraciones.

5.1.9.5.3.1. Localización de los puntos de monitoreo de vibraciones

5.1.9.5.3.2. Análisis de vibraciones área de estudio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Huella área de intervención directa de título minero 0745 Mina La Esmeralda.

Figura 2. Marco tectónico regional. En el esquema se resaltan las estructuras más importantes

Figura 3. Modelo integrado de evolución tectónica del VSM. Muestra el desarrollo de las fallas y estructuras que caracterizan la cuenca del VSM.

Figura 4. Unidades geológicas asociadas para el título minero 8-745 Mina La Esmeralda

Figura 5. Columna estratigráfica arenas de puzolanas asociados a los depósitos cuaternarios, yacimiento de interés del título minero 745 mina La Esmeralda

Figura 6. Cronoestratigrafía generalizada del contexto geológico del proyecto

Figura 7. Mapa geológico del área de influencia y distribución de los puntos de control en campo título minero 745 de la mina La Esmeralda a escala 1:5000.

Figura 8. Ubicación de perforaciones exploratorias en el contrato de concesión 745-73.

Figura 9. Descripción litológica del piezómetro ejecutado P8 en el área sur del título minero 745 mina La Esmeralda.

Figura 10. Planta geológica del TM 745 (polígono en verde) actualizada al año 2020.

Figura 11. Columna litológica nivel de descapote del yacimiento de Arenas Puzolánicas, TM 745. Mina La Esmeralda. Fuente: Adaptado y tomado Informe Geología y Geotecnia ICA II, CEMEX 2019

Figura 12. Modelo de elevación del terreno con base en el levantamiento topográfico al 2019, en amarillo el TM 745 y en rojo la huella de intervención directa según la secuencia minera proyectada.

Figura 13. Modelo geológico del contrato de concesión 0745-73.

Figura 14. Modelo de bloques contrato de concesión 0745. Fuente: PTO, 2008

Figura 15. Modelo tridimensional que ilustra la distribución de las reservas probadas y pit de explotación del contrato de concesión 0745.

Figura 16. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra LCPG-01. A) Se observa epidota granular (Ep), feldespato potásico (Fk) alteración arcillas y plagioclasa (Pg) con macla polisintética, XPL. B) Opacos (Op) con formas irregulares (materia orgánica) grano de feldespato potásico (Fk) con macla de la microlina, XPL. C) Venilla de carbonato, XPL. D) Venilla de carbonato en paragénesis con epidota (Ep) XPL. E. Minerales accesorios: Turmalina (Tur), Rutilo (Rt) y Zircón (Zrn), PPL. F) Igual que en la fotografía anterior, XPL.

Figura 17. Imágenes de caracterización (5X - 10X) muestra LCPG-21. A) Se observa textura general de la muestra, granos de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa tamaño de grano limo, PPL. B) Misma fotografía anterior, XPL. C) Detalle de granos de cuarzo (Qz), plagioclasa (Pg) y matriz arcillosa, PPL. D. Misma fotografía anterior, XPL. E) Evidencia de porosidad interpartícula y grano tamaño limo de feldespato potásico (Fk), PPL. F. Misma fotografía anterior, XPL.

Figura 18. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra LCPG-19. A) Se observa vista general de la muestra: micrita entremezclada con microesparita y cristal de pirita (Py), PPL. Misma fotografía anterior, XPL. C) Se

observan moldes de fósiles totalmente recristalizados por pseudoesparita, PPL. D) Misma fotografía anterior, XPL. E) Se observa venilla de calcita y materia orgánica (Mo), PPL. F) Misma fotografía anterior, XPL.

Figura 19. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra LCPG-14. A) Se observa estructura irregular de estilolito señalizada con flecha de color azul, en contacto con esparita y pseudoesparita, XPL. B) Fragmento de fósil (Fo) de braquiópodo, PPL. C. Fragmento de fósil (Fo) posiblemente de braquiópodo con textura fibrosa, parcial silicificación por calcedonia y evidencia de micritización, PPL. D) Misma fotografía anterior, XLP. E) Fósil de briozoo con parcial micritización, PPL. F) Fósil tabular e intraclasto, PPL.

Figura 20. Planta y secciones geológicas A.A' (arriba) y B-B'(abajo) del título minero 745 de la mina la Esmeralda.

Figura 21. Muestreo para el Proyecto de Arenas Puzolánicas TM 745.

Figura 22. Unidades geomorfológicas asociadas al TM 745.

Figura 23. Modelo de Elevación que expone la configuración de la geomorfología del área de influencia del título minero 745 mina La Esmeralda

Figura 24. Mapa de pendientes del terreno obtenido de la base topográfica detalle a octubre de 2019; se ilustra la distribución del TM 745 que hace parte de la Mina La Esmeralda.

Figura 25. Patrón drenaje en el área de influencia del título minero 745 de la Mina La Esmeralda.

Figura 26. Distribución procesos morfodinámicos identificados en la fotointerpretación ortofoto 2018

Figura 27. Distribución procesos morfodinámicos identificados en la fotointerpretación ortofoto 2020

Figura 28. Localización geográfica del Volcán Cerro Machín y el corregimiento de Payandé Tolima

Figura 29. Secuencia estratigráfica (esquemática) sección transversal sector de Gualanday río Coello (60 km) Cerro Machín

Figura 30. Mapa de amenaza volcánica del Volcán Machín, para el título minero 745.

Figura 31. Localización del Área de Influencia del TM745 en el mapa de Fallas activas de Colombia

Figura 32. Zonificación Sísmica Intensidad Esperada en el municipio de San Luis (Tolima) (Catálogo sísmico RSNC)

Figura 33. Localización del área de influencia del título minero 745 en el mapa del Catálogo sísmico de la Red Sismológica Nacional (1993-2018)

Figura 34. Localización del área de influencia del título minero 745 en el mapa de Amenaza Sísmica de la Red Sismológica Nacional (2020).

Figura 35. Localización del área de estudio en el mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa (escala 1:500.000).

Figura 36. Distribución de la pendiente en el Área de influencia de paisaje

Figura 37. Distribución de la calidad visual en el área de influencia.

Figura 38. Distribución de la fragilidad visual en el área de influencia.

Figura 39. Distribución del índice de belleza paisajística.

Figura 40. Distribución de las unidades de paisaje en el área de influencia.

Figura 41. Visibilidad del paisaje en el área de influencia.

Figura 42. Puntos de monitoreo de suelos

Figura 43. Mapa de suelos del área de influencia del medio abiótico

Figura 44. Mapa uso potencial de los suelos en el área de influencia abiótica

Figura 45. Mapa de uso actual de los suelos en el área de influencia abiótica

Figura 46. Mapa de conflictos de uso de los suelos en el área de influencia edáfica

Figura 47. Uso propuesto del EOT en el área de influencia edáfica

Figura 48. Clases agrológicas 4 (azul claro), 7 (café claro) y 8 (morado), en el área del título minero 745, según los Pomcas La Luisa y Coello, de fondo se observa el mapa de sombras y las curvas de nivel.

Figura 49. Localización del proyecto en la zonificación Hidrográfica

Figura 50. Red de drenaje en la zona de estudio

Figura 51. Mapa de pendiente en el área de estudio.

Figura 52. Localización de estaciones de precipitación.

Figura 53. Curva de doble masa en estaciones de precipitación.

Figura 54. Distribución temporal de la precipitación total mensual en las estaciones analizadas.

Figura 55. Variación anual de la precipitación en la estación La Resaca

Figura 56. Distribución espacial de la precipitación total anual.

Figura 57. Variación mensual de la temperatura media en las estaciones analizadas.

Figura 58. Relación entre la temperatura media anual y la elevación.

Figura 59. Distribución espacial de la temperatura media anual en la zona de estudio.

Figura 60. Comparación de caudales observados (línea roja) y simulados (línea negra) en el periodo de calibración del modelo IHACRES

Figura 61. Curva de duración de caudales Simulados vs Registrados Periodos de Calibración 1990-1994

Figura 62. Comparación de caudal observado y simulado en periodo de validación

Figura 63. Curva de Duración de Caudales Simulados vs Registrados Periodo de Validación 1996-1999.

Figura 64. Distribución temporal de caudales medios mensuales en el Zanjón Los Huilos. Periodo 1990-2019.

Figura 65. Variación de caudales medios anuales en el Zanjón Los Huilos.

Figura 66. Curva de duración de caudales diarios. Zanjón Los Huilos.

Figura 67. Esquema conceptual del balance hídrico.

Figura 68. Hidrograma Unitario Triangular del SCS

Figura 69. Representación gráfica de precipitaciones máximas ajustadas a diferentes funciones de distribución de probabilidad. Estación La Resaca.

Figura 70. Curvas PADF. Periodo de retorno de 10 años

Figura 71. Distribución de la precipitación para las subcuencas en estudio, Tr 100 años.

Figura 72. Mapa de cobertura vegetal en la zona de estudio

Figura 73. Mapa de tipos de suelo en la zona de estudio.

Figura 74. Localización de la estación Payandé y el sitio de vertimiento sobre el río Coello

Figura 75. Distribución temporal de caudales medios mensuales en el río Coello. Periodo 1983-2017.

Figura 76. Curva de duración de caudales diarios. Río Coello en sitio de vertimiento.

Figura 77. Prueba de datos dudosos de caudales máximos - Estación río Coello - Payandé

Figura 78. Ajuste probabilístico de caudales máximos - Estación río Coello - Payandé

Figura 79. Ajuste probabilístico de caudales mínimos- Río Coello en sitio de vertimiento

Figura 80. Localización sitios de monitoreo calidad de agua superficial

Figura 81. Comportamiento diario caudal río Coello Febrero de 2021

Figura 82. Comportamiento diario caudal río Coello Marzo de 2021

Figura 83. pH cuerpos de agua superficial

Figura 84. Aluminio cuerpos de agua superficial

Figura 85. Fenoles cuerpos de agua superficial

Figura 86. Hierro cuerpos de agua superficial

Figura 87. Manganeso cuerpos de agua superficial

Figura 88. Níquel cuerpos de agua superficial

Figura 89. Turbidez cuerpos de agua superficial

Figura 90. Coliformes fecales cuerpos de agua superficial

Figura 91. Coliformes totales cuerpos de agua superficial

Figura 92. Comportamiento pH Sedimentos

Figura 93. Comportamiento Cloruros y sulfatos sedimentos

Figura 94. Comportamiento Conductividad sedimentos

Figura 95. Comportamiento fenoles, hidrocarburos, grasas y aceites sedimentos

Figura 96. Comportamiento Nitratos y Nitritos sedimentos

Figura 97. Recorrido de usos y usuarios

Figura 98. Geología regional área de modelación hidrogeológica mina La Esmeralda

Figura 99. Sección geológica A-A' Área Evaluación Hidrogeologica Mina La Esmeralda

Figura 100. Mapa de distribución de las unidades hidrogeológicas en en el área de la mina La Esmeralda

Figura 101. Mapa de interés hidrológico del área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 102. Mapa hidrogeológico del área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 103. Esquema conceptual del balance hídrico en el área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 104. Esquema para el cálculo de recarga.

Figura 105. Distribución Espacial del Coeficiente de Infiltración, del área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 106. Distribución Espacial de la precipitación que infiltra (Pi), del área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 107. Distribución Espacial de la temperatura media anual y la evapotranspiración potencial del área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 108. Distribución Espacial del agua disponible en el área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 109. Distribución Espacial de la humedad disponible (Hd) en el área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 110. Distribución Espacial de la Recarga por Infiltración de Agua de Lluvia en el área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 111. Variables del Balance del Tajo mina La Esmeralda.

Figura 112. Localización de los puntos de agua subterránea asociados a los piezómetros identificados en el área de estudio mina La Esmeralda.

Figura 113. Estaciones Monitoreada y/o Muestreada en agosto 2020.

Figura 114. Error del Balance Iónico (%) y suma de Concentraciones de los Principales

Figura 115. Correlación entre CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y TDS (mg/L) de monitoreos realizados en agosto

Figura 116. Comparación de las concentraciones de metales disueltos y totales de muestras filtradas y no filtradas de aguas superficiales y subterráneas en agosto 2020

Figura 117. Diagrama Piper y concentraciones (meq/L) de iones principales en las aguas

Figura 118. Diagrama Schoeller de concentraciones (meq/L) de iones principales en las aguas superficiales y subterráneas.

Figura 119. Composición isotópica de precipitaciones y sumideros del pit (Gotta 2013).

Figura 120. Estaciones Muestreadas por Hidroceron (2007) y GOTTA (2013).

Figura 121. Ubicación de la Estación Meteorológica de Bogotá (2 250 m s.n.m.) con registros mensuales continuos de ^2H - ^{18}O entre 1971 y 2016.

Figura 122. Composición isotópica de precipitaciones mensuales (promedio) y Línea Meteórica Global (GMWL) y Local (LMWL) de Bogotá (2 250 m s.n.m.) Promedios mensuales, anual (IAvgO18), y promedio ponderado (IWAvgO18 = $\frac{\sum(\delta^i \cdot P_i)}{\sum P_i}$ según la cantidad de precipitación mensual.
Fuente: GNIP, modificado de WES Perú SAC, 2020.

- Figura 123. Valores 2H-18O de las aguas superficiales y subterráneas.
- Figura 124. Interpretación de la relación entre la quebrada Chicalá y la filtración INF3.
- Figura 125. Interpretación de la relación entre los Pit Lake PL1 – PL2 y filtraciones INF1 y INF2.
- Figura 126. Localización monitoreo agua subterránea
- Figura 127. Comportamiento Temperatura/Oxígeno – Agua subterránea
- Figura 128. Comportamiento Alcalinidad – Agua subterránea
- Figura 129. Comportamiento pH – Agua subterránea
- Figura 130. Comportamiento Conductividad – Agua Subterránea.
- Figura 131. Comportamiento cloruros y Sulfatos-agua subterránea
- Figura 132. Comportamiento Dureza Total -agua subterránea
- Figura 133. Comportamiento comunidades microbiológicas
- Figura 134. Tipos de agua Diagrama Piper
- Figura 135. Diagrama Piper aguas subterráneas mina La Esmeralda
- Figura 136. Diagrama Stiff aguas subterráneas mina La Esmeralda
- Figura 137. Esquema del Modelo Hidrogeológico Conceptual (3D).
- Figura 138. Geometría y Malla del Modelo Numérico.
- Figura 139. Conductividad Hidráulica Modelo Numérico Inicial.
- Figura 140. Distribución de Recarga por Precipitación.
- Figura 141. Límites y Condiciones de Contorno del Modelo.
- Figura 142. Pozos de observación ingresados en el modelo para calibración..
- Figura 143. Cálculo del Balance Hídrico – Estado Actual.
- Figura 144. Gráfico de valores del potencial hidráulico calculado y observado en pozos de
- Figura 145. Superficies Piezométricas Calculadas.
- Figura 146. Vista General del Nivel Piezométrico.
- Figura 147. Representación en el Modelo Numérico de la Expansión del Tajo.
- Figura 148. Representación en el Modelo Numérico de la Expansión de la Escombrera
- Figura 149. Balance Hídrico Escenario Ampliación de la Escombrera Superior E1ET1
- Figura 150. Zona donde se Aplicó el Cambio de Permeabilidad dentro del Modelo Numérico.
- Figura 151. Comparación del Balance Obtenido en los Escenarios de Evaluación de Desagüe de la Quebrada Chicalá.
-

Figura 152. Registro del Catálogo Sísmico Colombiano (RCSC) de sismos más cercanos al área del estudio de magnitud mayor a 2,0.

Figura 153. Limitaciones del uso del GSI a partir de la escala de análisis empleada. Adaptado de Hoek et.al (2013).

Figura 154. Perfiles de rugosidad y sus valores JRC correspondientes.

Figura 155. Relación entre los esfuerzos principales mayor y menor y su equivalencia en el criterio de Mohr -Coulomb.

Figura 156. Porcentaje de tamaños de partículas (a), humedad (b) e índice de plasticidad (c) en profundidad en las escombreras de la zona de influencia de la Mina Esmeralda.

Figura 157. Correlación parámetros de resistencia a partir de los resultados de exploración directa del subsuelo.

Figura 158. Retroanálisis condición actual arenas puzolánicas.

Figura 159. Análisis de sensibilidad cohesión arenas puzolánicas

Figura 160. Relación del área bajo la curva de la distribución normal y la desviación estándar.

Figura 161. Mecanismo de falla general por corte. Superficie Circular.

Figura 162. Plano zonificación geotécnica Área de influencia Título Minero 745.

Figura 163. Secciones de análisis evaluación de estabilidad de taludes TM 745.

Figura 164. Sección 1 talud final explotación Título Minero 745.

Figura 165. Sección 2 talud final explotación Título Minero 745.

Figura 166. Sección 3 talud final explotación Título Minero 745.

Figura 167. Histograma Factores de Seguridad obtenidos a partir de 10.000 simulaciones ejecutadas mediante la metodología MonteCarlo para la Sección 3 del Título Minero 745.

Figura 168. Secciones de análisis. Estabilidad de taludes en escombreras de la mina La Esmeralda.

Figura 169. Sección A-A Escombrera superior actual.

Figura 170. Sección D-D Extensión escombrera superior.

Figura 171. Sección F-F Escombrera retrollenado.

Figura 172. Evaluación de la Amenaza por estabilidad de taludes (Procesos remoción en masa) - Escenario actual. Condición estática.

Figura 173. Evaluación de la Amenaza por estabilidad de taludes(Procesos remoción en masa) - Escenario cierre (20 años). Condición extrema por sismo.

Figura 174. Localización estaciones climatológicas

Figura 175. Boxplot Brillo Solar - Estación Aeropuerto Perales

Figura 176. Boxplot Evaporación - Estación Aeropuerto Perales

Figura 177. Boxplot Humedad Relativa - Estación Aeropuerto Perales

Figura 178. Boxplot Temperatura Media - Estación Aeropuerto Perales

- Figura 179. Boxplot Temperatura Máxima - Estación Aeropuerto Perales
- Figura 180. Boxplot Temperatura Mínima - Estación Aeropuerto Perales
- Figura 181. Boxplot Velocidad Media del Viento - Estación Aeropuerto Perales
- Figura 182. Boxplot Velocidad Máxima del Viento - Estación Aeropuerto Perales
- Figura 183. Boxplot Humedad Relativa - Estación Chicoral
- Figura 184. Boxplot Temperatura Media - Estación Chicoral
- Figura 185. Boxplot Temperatura Máxima - Estación Chicoral
- Figura 186. Boxplot Temperatura Mínima - Estación Chicoral
- Figura 187. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Brillo solar
- Figura 188. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Evaporación
- Figura 189. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Humedad relativa
- Figura 190. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Temperatura media
- Figura 191. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Temperatura máxima
- Figura 192. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Temperatura mínima
- Figura 193. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Humedad relativa
- Figura 194. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Temperatura media
- Figura 195. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Temperatura máxima
- Figura 196. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Temperatura mínima
- Figura 197. Variabilidad de la temperatura media mensual multianual - Estación Apto Perales
- Figura 198. Variabilidad de la temperatura media mensual multianual - Estación Chicoral
- Figura 199. Variabilidad de la temperatura mínima mensual multianual - Estación Apto Perales
- Figura 200. Variabilidad de la temperatura mínima mensual multianual - Estación Chicoral
- Figura 201. Variabilidad de la temperatura máxima mensual multianual - Estación Apto Perales
- Figura 202. Variabilidad de la temperatura máxima mensual multianual - Estación Chicoral
- Figura 203. . Variabilidad de la humedad relativa media mensual multianual. Periodo 1977 - 2020, Apto Perales
- Figura 204. Variabilidad de la humedad relativa media mensual multianual. Periodo 1978 - 2020, Chicoral.
- Figura 205. Variabilidad del brillo solar medio mensual multianual. Periodo 1979 - 2020.
- Figura 206. . Variabilidad de la evaporación media mensual multianual. Periodo 1978 - 2017
- Figura 207. . Variabilidad de velocidad media mensual multianual. Periodo 1977 - 2017
- Figura 208. Rosa de vientos diurna, estación Aeropuerto Perales
-

Figura 209. Rosa de vientos nocturna, estación Aeropuerto Perales

Figura 210. Ubicación de aforos vehiculares

Figura 211. Localización receptores sensibles

Figura 212. Ubicación estaciones de monitoreo (2018 - 2019)

Figura 213. Ubicación estaciones de monitoreo 2020

Figura 214. Promedio diario de temperatura

Figura 215. Promedio diario de humedad relativa

Figura 216. Precipitación acumulada

Figura 217. Promedio diario de presión barométrica

Figura 218. Promedio diario de velocidad del viento

Figura 219. Rosa de vientos

Figura 220. Distribución de frecuencias de velocidad del viento

Figura 221. Distribución espacial de las Rosas de Viento

Figura 222. Ubicación de los puntos de monitoreo de ruido ambiental y emisión de ruido

Figura 223. Ubicación de los puntos de monitoreo de emisión de ruido

Figura 224. Ubicación de los puntos de monitoreo

Figura 225. Ubicación de los tres puntos de monitoreo de vibraciones disponibles en la zona de influencia del proyecto

Figura 226. Velocidad pico de partícula para cada una de las voladuras realizadas desde enero de 2018 a septiembre de 2020

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de puntos de control geológico durante la visita de reconocimiento área de influencia título minero 745 mina La Esmeralda.

Tabla 2. Sondeos exploratorios campañas del subsuelo

Tabla 3. Reporte de reservas probadas contrato 745

Tabla 4. Resumen categorización Recursos y Reservas – contrato de concesión 745

Tabla 5. Relación de discontinuidades en el área del título minero 745 mina La Esmeralda.

Tabla 6. Síntesis de provincias y paisajes geomorfológicos para el AI.

Tabla 7. Descripción de las zonas de Amenaza por Lahares que afectaron el título minero 745

Tabla 8. Zona de amenaza sísmica para el municipio San Luis (Tolima) y los valores de Aa, Av, Ae y Ad.

Tabla 9. Distribución de las Pendientes en el Área de Influencia

Tabla 10. Coberturas naturales y artificiales presentes en el área de influencia.

Tabla 11. Superficie ocupada por cada uno de los elementos del paisaje para estimar la calidad visual.

Tabla 12. Superficie ocupada por cada uno de los elementos del paisaje para estimar la fragilidad visual.

Tabla 13. Superficie ocupada por cada uno de los elementos del paisaje para estimar la belleza paisajística.

Tabla 14. Superficie ocupada por cada una de las unidades de paisaje presentes en el Área de Influencia.

Tabla 15. Visibilidad de las unidades en el área de influencia.

Tabla 16. Tamaño de la discordancia por unidad de paisaje para el área de influencia.

Tabla 17. Coordenadas Puntos de Descripción y Monitoreo de Suelos

Tabla 18. Unidades Geomorfológicas identificadas en el área de Influencia del componente geosférico

Tabla 19. Leyenda de suelos en el área de estudio

Tabla 20. Clases y subclases agrológicas y uso potencial del suelo en el área de estudio

Tabla 21. Cobertura y uso actual del suelo

Tabla 22. Tipos de conflictos de uso del suelo y símbolo utilizado

Tabla 23. Conflicto de usos de suelo en el área de influencia del proyecto

Tabla 24. Localización del proyecto en la zonificación Hidrográfica

Tabla 25. Coordenadas sistemas lóticos confluencia al río al que tributa

Tabla 26. Clasificación del coeficiente de compacidad.

Tabla 27. Formulaciones empíricas para el cálculo del tiempo de concentración.

Tabla 28. Características morfométricas en las subcuencas de interés.

Tabla 29. Clasificación del índice de sinuosidad.

Tabla 30. Índice de sinuosidad estimado.

Tabla 31. Estaciones de precipitación empleadas.

Tabla 32. Resumen de pruebas estadísticas aplicadas a los registros de precipitación.

Tabla 33. Vacíos de información en estaciones de precipitación.

Tabla 34. Variación en los parámetros estadísticos - Media diaria. Periodo 1990 - 2019.

Tabla 35. Variación en los parámetros estadísticos - Desviación estándar. Periodo 1990 - 2019.

Tabla 36. Precipitación total mensual multianual en mm en las estaciones cercanas al sitio de estudio. Periodo 1990-2019.

Tabla 37. Temperatura media mensual multianual (°C) en las estaciones cercanas al área de influencia

Tabla 38. Valores Referenciales del Criterio de Nash - Sutcliffe

Tabla 39. Parámetros Calibrados

Tabla 40. Resultados del Modelo IHACRES

Tabla 41. Caudal medio mensual multianual en l/s en los cuerpos de agua identificados. Periodo 1990-2019.

Tabla 42. Caudales esperados en los arroyos analizados para diferentes confiabilidades en l/s.

Tabla 43. Precipitación mensual multianual en las subcuencas.

Tabla 44. Evapotranspiración potencial (método de Thornthwaite).

Tabla 45. Evapotranspiración potencial en mm (método de Tanque evaporímetro).

Tabla 46. Evapotranspiración potencial en mm (Método de Penman-Monteith).

Tabla 47. Resultados obtenidos de evapotranspiración potencial.

Tabla 48. Caudal medio mensual multianual en los drenajes analizados.

Tabla 49. Valores de CN y capacidad de almacenamiento del suelo para las subcuencas en estudio.

Tabla 50. Balance hídrico en la subcuenca del Zanjón Los Huilos (mm).

Tabla 51. Infiltración potencial estimada en cada subcuenca.

Tabla 52. Precipitaciones máximas en mm para diferentes funciones de distribución de frecuencia. Estación La Resaca.

Tabla 53. Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno

Tabla 54. Factor de reducción por área.

Tabla 55. Valores de CNII para diferentes usos de tierra

Tabla 56. Valores de CNII para las subcuencas analizadas.

Tabla 57. Resumen de los parámetros de modelación para estimar caudales máximos con el método del Hidrograma Unitario del SCS.

Tabla 58. Caudales máximos en m³/s asociados a diferentes periodos de retorno en las subcuencas analizadas.

Tabla 59. Caudales mínimo del caudal medio mensual.

Tabla 60. Caudal medio mensual multianual en m³/s en el río Coello. Periodo 1983-2017.

Tabla 61. Caudales esperados en el río Coello para diferentes confiabilidades en m³/s.

Tabla 62. Caudales máximos para diferentes funciones de distribución de frecuencia y valores de chi-cuadrado, estación río Coello – Payandé.

Tabla 63. Caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno en estación río Coello – Payandé, Ajuste Log Pearson

Tabla 64. Caudales máximos del río Coello hasta el sitio de vertimiento, a partir de la estación Payandé.

Tabla 65. Caudales mínimos para diferentes funciones de distribución de frecuencia y valores de chi-cuadrado en el río Coello, sitio de vertimiento.

Tabla 66. Caudales mínimos asociados a diferentes periodos de retorno en estación río Coello – Payandé, Ajuste Gumbel

Tabla 67. Índices para la zona hidrográfica.

Tabla 68. Calificación de Rangos del Índice de Regulación Hídrica.

Tabla 69. Calificación de Rangos del Índice de Aridez.

Tabla 70. Índice de Aridez en las subcuencas analizadas.

Tabla 71. Calificación de rangos del índice de uso del agua

Tabla 72. Índice de uso del agua

Tabla 73. Calificación de Rangos del Índice de Vulnerabilidad Hídrica

Tabla 74. Límites máximos permisibles en diferentes usos del recurso hídrico, Decreto 1076 de 2015

Tabla 75. Variables y Métodos Analíticos por el Laboratorio

Tabla 76. Puntos de monitoreo agua superficial época húmeda

Tabla 77. Resultados monitoreo calidad de agua superficial época de lluvias

Tabla 78. Resultados sedimentos río Coello

Tabla 79. Índices de Contaminación (ICOs) para las fuentes superficiales del área de influencia

Tabla 80. Índice de Langelier

Tabla 81. Capacidad Buffer

Tabla 82. Índice IACAL

Tabla 83. Orden de prioridad Usos del agua

Tabla 84. Usos definidos de acuerdo a objetivos de calidad del agua

Tabla 85. Caudal concesionado por tipo de uso de agua para la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

Tabla 86. Usuarios de interés POMCA subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

Tabla 87. Caudal concesionado por tipo de uso de agua para la subzona hidrográfica del río Coello

Tabla 88. Usuarios de interés POMCA subzona hidrográfica del río Coello

Tabla 89. Vertimientos en recorridos de campo

Tabla 90. Vertimientos municipales

Tabla 91. Relación de unidades acuíferas en el área del título minero 6823

Tabla 92. Componentes del Coeficiente de Infiltración.

Tabla 93. Aproximación de propiedades físicas del suelo.

Tabla 94. Variables Contempladas en el Balance del Tajo.

Tabla 95. Balance del Tajo (L/s)

Tabla 96. Relación de inventario de puntos de agua subterránea asociada a piezómetros en el área de estudio mina La Esmeralda.

Tabla 97. Ubicación de las estaciones de aguas subterráneas monitoreadas durante la campaña en campo.

Tabla 98. Ubicación de las estaciones de aguas subsuperficiales monitoreadas durante la campaña en campo

Tabla 99. Ubicación de las estaciones de aguas superficiales monitoreadas durante la campaña en campo.

Tabla 100. Preparación y análisis de los parámetros inorgánicos

Tabla 101. TDS (mg/L), pH, Dureza, Saturación de Calcita y Tipos de Aguas Subterráneas y Superficiales en la Mina La Esmeralda

Tabla 102. Factores de fraccionamiento (α) y enriquecimiento $\{\epsilon = (\alpha-1)*1000\}$ de ^{18}O y 2H durante equilibrio (100 % humedad), en función a la temperatura de transición líquido/vapor.

Tabla 103. $\delta^{18}O$ y δ^2H (‰ SMOW) de las aguas, valor inicial pre-evaporación en la intersección con la LMWL de Bogotá, y porcentaje de agua evaporada (1-f).

Tabla 104. Localización puntos de monitoreo calidad de agua subterránea

Tabla 105. Resultados monitoreo calidad de agua subterránea

Tabla 106. Relación Conductividad – Mineralización del agua.

Tabla 107. Clasificación del agua según su dureza total.

Tabla 108. Balance iónico resultados calidad de aguas subterráneas

Tabla 109. Composición del agua diagrama Piper

Tabla 110. Recarga Calibrada dentro del Modelo.

Tabla 111. Parámetros de Calibración en el Modelo

Tabla 112. Reporte de sismicidad Red Sismológica Nacional de Colombia (1993-2020) para el corregimiento de Payandé en el departamento del Tolima

Tabla 113. Perforaciones efectuadas Mina La Esmeralda.

Tabla 114. Localización de la línea de refracción sísmica efectuadas en Mina La Esmeralda para la zona de la escombrera superior. TM 745

Tabla 115. Muestreo efectuado en la zona norte de la Mina La Esmeralda.

Tabla 116. Perfiles tipo Mina La Esmeralda. Zona de operación minera

Tabla 117. Estudios previos usados como referencia para la caracterización geotécnica

Tabla 118. Ensayos geotécnicos realizados sobre la caliza en el estudio geotécnico mina Payandé (Tol.).

Tabla 119. Ensayos geotécnicos sobre suelo realizados en el estudio de Actualización del estudio geotécnico de las escombreras de la mina de caliza la esmeralda. Payandé (Tol) - Cemex Colombia S.A (2014)

Tabla 120. Ensayos realizados en el Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina la esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).

Tabla 121. Ensayos geotécnicos realizados por GYG (2019).

Tabla 122. Propiedades geotécnicas materiales en escombreras y suelos en la zona de estudio.

Tabla 123. Propiedades geotécnicas macizos rocosos. Criterio Hoek - Brown.

Tabla 124. Propiedades geotécnicas macizos rocosos. Criterio Mohr Coulomb. Tomado de Rincón (2004) e IGP (2019).

Tabla 125. Valores de coeficiente de variabilidad para algunos parámetros geotécnicos

Tabla 126. Parámetros de los materiales para análisis probabilísticos

Tabla 127. Niveles de agua en los piezómetros instalados Mina La Esmeralda.

Tabla 128. Niveles de agua en los piezómetros instalados en la escombrera superior de la Mina La Esmeralda.

Tabla 129. Valores de KST/amax Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes. (AIS-10)

Tabla 130. Criterios de Análisis para la Evaluación de la Amenaza. Términos de referencia de la ANLA.

Tabla 131. Criterios de Análisis para la Evaluación de la Amenaza según MAVDT(2010)

Tabla 132. UGI/UGS. Proyecto La Esmeralda TM 6823.

Tabla 133. Índices de Susceptibilidad para las las UGS del Proyecto La Esmeralda TM 745.

Tabla 134. Índices de Susceptibilidad para los parámetros relacionados con estructuras. Proyecto La Esmeralda TM 745.

Tabla 135. Índices de Susceptibilidad para las pendientes del terreno. Proyecto La Esmeralda TM 745.

Tabla 136. Índices de Susceptibilidad asociados al parámetro "Inventario de deslizamientos y procesos erosivos". Proyecto La Esmeralda TM 745.

Tabla 137. Resumen factor de seguridad y probabilidad de falla de los taludes de cierre del título 745 mediante el método de equilibrio límite.

Tabla 138. Resultados de los análisis de estabilidad Escombreras Mina La Esmeralda.

Tabla 139. Evaluación de Amenaza para los taludes de la mina La Esmeralda

Tabla 140. Características geométricas de las excavaciones a realizarse en el TM 745, CEMEX (2018)

Tabla 141. Puntos de control topográfico instalados en las Escombreras del Proyecto La Esmeralda, año 2019.

Tabla 142. Piezómetros instalados en las escombreras del proyecto La Esmeralda año 2019.

Tabla 143. Piezómetros instalados Mina La Esmeralda.

Tabla 144. Piezómetros proyectados a instalar Mina La Esmeralda.

Tabla 145. Inclínómetros instalados en las escombreras del proyecto La Esmeralda año 2019.

Tabla 146. Inclínómetros proyectados a instalar proyecto La Esmeralda.

Tabla 147. Características de las estaciones climatológicas utilizadas

Tabla 148. Resumen de pruebas estadísticas aplicadas a los registros de la estación Apto Perales

Tabla 149. Resumen de pruebas estadísticas aplicadas a los registros de la estación Chicoral

Tabla 150. Dato anómalos Evaporación - Apto Perales

Tabla 151. Datos anómalos Temperatura media - Apto Perales

Tabla 152. Dato anómalos Temperatura máxima - Apto Perales

Tabla 153. Datos anómalos Temperatura mínima - Apto Perales

Tabla 154. Temperatura media mensual multianual. Periodo 1977 - 2017.

Tabla 155. Temperatura mínima mensual multianual. Periodo 1977 - 2020.

Tabla 156. . Temperatura máxima mensual multianual. Periodo 1977 - 2020

Tabla 157. Humedad relativa media mensual multianual. Periodo 1977 - 2020.

Tabla 158. Brillo solar medio mensual medio mensual multianual. Periodo 1979 - 2020.

Tabla 159. Evaporación media mensual multianual. Periodo 1978 - 2017.

Tabla 160. Presión atmosférica estimada para las estaciones climatológicas.

Tabla 161. Velocidad media mensual multianual. Periodo 1977 - 2017

Tabla 162. Frecuencia de velocidad media del viento en la estación Aeropuerto Perales

Tabla 163. Frecuencia de dirección del viento en la estación Aeropuerto Perales

Tabla 164. Fuentes dispersas de emisión (mina 4205) Escenario A

- Tabla 165. Fuentes lineales de emisión (mina 4205) Escenario A
- Tabla 166. Inventario de fuentes de emisión visita técnica
- Tabla 167. Ubicación de puntos de aforo
- Tabla 168. Resultados día hábil, vía 1
- Tabla 169. Resultados día no hábil, vía 1
- Tabla 170. Resultados día hábil, vía 2
- Tabla 171. Resultados día no hábil, vía 2
- Tabla 172. Coordenadas de receptores sensibles
- Tabla 173. Emisiones mina 4205 Escenario A
- Tabla 174. Factores de emisión aforos vehiculares
- Tabla 175. Datos emisiones rodamiento en vías sin pavimentar Escenario A
- Tabla 176. Resultados emisiones rodamiento en vías sin pavimentar Escenario A
- Tabla 177. Resumen flota vehicular existente
- Tabla 178. Resultados emisiones por combustión interna escenario A
- Tabla 179. Localización estaciones de monitoreo (2018-2019)
- Tabla 180. Localización estaciones de monitoreo 2020
- Tabla 181. Punto de monitoreo CA1
- Tabla 182. Punto de monitoreo CA2
- Tabla 183. Punto de monitoreo CA3
- Tabla 184. Métodos de referencia
- Tabla 185. Equipos de monitoreo.
- Tabla 186. Información meteorológica
- Tabla 187. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire
- Tabla 188. Resultados de material particulado como PM10 - Edificio Cemex (estación fija)
- Tabla 189. Resultados de material particulado como PM10 -I.E. San Miguel sede Primaria
- Tabla 190. Resultados de material particulado como PM10 - Edificio Cemex (estación fija)
- Tabla 191. Resultados de material particulado como PM10 -I.E. San Miguel sede Primaria
- Tabla 192. Resultados de monitoreo entre noviembre y diciembre de 2018
- Tabla 193. Resultados de monitoreo noviembre de 2018
- Tabla 194. Resultados a condiciones de referencia – CA1
-

Tabla 195. Comparación de resultados Estación CA1

Tabla 196. Resultados a condiciones de referencia – CA2

Tabla 197. Comparación de resultados Estación CA2

Tabla 198. Resultados a condiciones de referencia – CA3

Tabla 199. Comparación de resultados Estación CA3

Tabla 200. Índice calidad aire SVCAI – Estación CA1

Tabla 201. Índice calidad aire SVCAI – Estación CA2

Tabla 202. Índice calidad aire SVCAI – Estación CA3

Tabla 203. Resultados a condiciones de referencia – CA1

Tabla 204. Comparación de resultados Estación CA1

Tabla 205. Resultados a condiciones de referencia – CA2

Tabla 206. Comparación de resultados Estación CA2

Tabla 207. Resultados a condiciones de referencia – CA3

Tabla 208. Comparación de resultados Estación CA3

Tabla 209. Índice calidad aire SVCAI – Estación CA1

Tabla 210. Índice calidad aire SVCAI – Estación CA2

Tabla 211. Índice calidad aire SVCAI – Estación CA3

Tabla 212. Descripción de los puntos de monitoreo de emisión de ruido

Tabla 213. Descripción de los puntos de monitoreo de ruido ambiental

Tabla 214. Límites máximos permisibles de emisión de ruido según la clasificación del suelo para el periodo diurno y nocturno.

Tabla 215. Límites máximos permisibles de ruido ambiental según la clasificación del suelo para el periodo diurno y nocturno.

Tabla 216. Niveles de emisión de ruido resultantes en los puntos de medición - Comparación con el estándar máximo permisible para emisión de ruido para horario diurno

Tabla 217. Niveles de emisión de ruido resultantes en los puntos de medición - Comparación con el estándar máximo permisible para emisión de ruido para horario nocturno

Tabla 218. Niveles de ruido ambiental resultantes en los puntos de medición - Comparación con el estándar máximo permisible para emisión de ruido para horario diurno.

Tabla 219. Niveles de ruido ambiental resultantes en los puntos de medición - Comparación con el estándar máximo permisible para emisión de ruido para horario nocturno.

Tabla 220. Descripción de los puntos de monitoreo

Tabla 221. Límites máximos permisibles según la clasificación del suelo para el periodo diurno y nocturno

Tabla 222. Resumen de la Incertidumbre de medición para LAeq

Tabla 223. Especificaciones técnicas del sonómetro empleado

Tabla 224. Verificación del equipo de medición antes y después del monitoreo

Tabla 225. Niveles de ruido periodo diurno día hábil

Tabla 226. Niveles de ruido periodo diurno día No hábil

Tabla 227. Niveles de ruido periodo nocturno día hábil

Tabla 228. Niveles de ruido periodo nocturno día No hábil

Tabla 229. Comparación entre los resultados de los niveles de ruido y los límites establecidos por la norma

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Depósitos aluviales (Qal) cubriendo de manera discordante los depósitos de arenas puzolánicas, sobre el punto de control 834, mina de puzolanas. Coord. Este 4 766 552; Coord. Norte 2 033 731.

Fotografía 2. Depósitos aluviales (Qal), sobre el punto de control 832, matriz soportados, con un espesor de 4 m, adyacente mina de puzolanas. Coord. Este 4 766 418; Coord. Norte 2 033 454.

Fotografía 3. Depósitos aluviales de morfología de terrazas (Qt) asociado a arenas medias a gruesas con gravas de rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias principalmente, de formas subredondeadas, conformando la mina de puzolanas, punto de control 826. Coord. Este 4 766 411; Coord. Norte 2 033 729.

Fotografía 4. Arcillolitas violáceas con concreciones arenosas de grano fino ligeramente calcáreas haciendo parte del punto de control 831 al suroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 263; Coord. Norte 2 033 548.

Fotografía 5. Areniscas de grano medio a conglomerático y capas delgadas de conglomerados en matriz areno-arcillosa con gravas tamaños gránulos de rocas de variada composición de formas subredondeadas a subangulares en el punto de control 833 al sur del polígono 745 y título de explotación actual 4205 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 263; Coord. Norte 2 033 548.

Fotografía 6. Morfologías colinadas de los depósitos de Caliche (Tsc) cubriendo de manera discordante a rocas calcáreas de las formación Payandé (Trsp) en el área del título minero 745 con vista al W desde el punto de control 824. Coord. Este 4 766 408; Coord. Norte 2 033 266.

Fotografía 7. Textura amorfa de los depósitos de Caliche (Tsc), fragmentos de calizas grisáceas, limolitas y esporádicas areniscas envueltos en una matriz de carbonatos precipitados, cubren de manera discordante rocas calcáreas de la Formación Payandé (Trsp) en el área del título minero 745, punto de control 844. Coord. Este 4 766 881; Coord. Norte 2 033 940.

Fotografía 8. Lutitas de tonos violáceos calcáreas con líticos oscuros volcánicos de la Formación Saldaña (Trjs), meteorizadas y muy fracturadas, adyacente al área del título minero 745 punto de control 852. Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 866.

Fotografía 9. Areniscas de grano fino ligeramente calcáreas, líticas oscuras, de tonos rojizos de la Formación Saldaña (Trjs), meteorizadas y fracturadas, adyacente al área del título minero 745 punto de control 853. .Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 897.

Fotografía 10. Calizas arenosas de grano fino grisáceas con esporádicas venillas de carbonatos, líticas oscuras, cortadas por diques afaníticos de composición andesítica de tonos gris verdoso oscuro, de la Formación Saldaña (Trjs), adyacente al área del título minero 745 punto de control 854. Coord. Este 4 766 351; Coord. Norte 2 033 974.

Fotografía 11. Intercalaciones de lutitas calcáreas grisáceas laminadas con calizas gris claro alteradas, meteorizadas de la Formación Saldaña (Trjs), en el área del título minero 745, punto de control 847. Coord. Este 4 766 914; Coord. Norte 2 033 851.

Fotografía 12. Vista al Este desde el punto de control 848, donde se presenta contacto fallado entre las unidades calizas de la Formación Payandé (Trsp) izquierda y rocas de la Formación Saldaña (Trjs) derecha, en la cuenca del río Coello. Coord. Este 4 767 014; Coord. Norte 2 033 865.

Fotografía 13. Márgenes del río Coello mostrando el dique afanítico gris azulado intruye las dos unidades triásicas asociadas a las formaciones Payandé (Trsp) y Saldaña (Trjs), sobre el punto de control 849, al NE del área del título 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 034; Coord. Norte 2 033 892.

Fotografía 14. Calizas grisáceas oscuras micríticas, con presencia de fósiles (corales) de la Formación Payandé (Trsp), en el punto de control 835, sector Los Huilos, adyacente al título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 395; Coord. Norte 2 033 844.

Fotografía 15. Calizas azuladas masivas con microvenillas de calcita de la Formación Payandé (Trsp) sobre un drenaje seco en el sector Los Huilos, adyacente al título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 395; Coord. Norte 2 033 844

Fotografía 16. Calizas grises azuladas masivas de la Formación Payandé (Trsp) cortadas por diques oscuros grisáceos afaníticos composición andesítica sobre ambas márgenes del río Coello, al fondo contacto fallado con la formación Saldaña (Trjs), punto de control 849, al NE del área del título 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 034; Coord. Norte 2 033 892

Fotografía 17. Roca de composición calcárea, con venillas de calcita y piritita diseminada pit minero actual, mina La Esmeralda.

Fotografía 18. Calizas masivas grises azuladas de la formación Payandé del punto de control 831. Se observa la estratificación con rumbo preferente al NE, buzando al SE y dos familias de diaclasas D1 y D2 que cortan casi ortogonalmente a estos estratos. Coord. Este 4 766 263; Coord. Norte 2 033 548

Fotografía 19. Calizas masivas grises azuladas de la formación Payandé del punto de control 851. Se observa la estratificación con rumbo preferente al NE y buzamiento al SE, sector los Huilos, título minero 745. Coord. Este 4 766 380; Coord. Norte 2 033 889

Fotografía 20. Calizas arenosas de grano fino grisáceas con esporádicas venillas de carbonatos, líticas oscuras, cortadas por diques afaníticos de composición andesítica, de la Formación Saldaña (Trjs); se muestra la estratificación con buzamiento al SE y dos familias de diaclasas, una ortogonal a la estratificación, punto de control 854. Coord. Este 4 766 351; Coord. Norte 2 033 974

Fotografía 21. Areniscas de grano medio a conglomerático y capas delgadas de conglomerados en el punto de control 833 al sur del polígono 745, mostrando la estratificación de sus capas con rumbo al NW y buzando al NE. Coord. Este 4 766 394; Coord. Norte 2 033 337

Fotografía 22. Contacto fallado entre las formaciones Payandé (Trsp), izquierda con rumbo de sus estratos al NW y buzamientos al NE, derecha se observan rocas lutíticas y calcáreas de la formación Saldaña (Trjs) con rumbo NE y

buzando al NW, cortadas por diques afaníticos oscuros, punto de control 849, al NE del área del título 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 034; Coord. Norte 2 033 892

Fotografía 23. Colinas bajas y superficies ligeramente inclinadas a onduladas y planas en suelos y rocas de las formaciones Saldaña (Trjs), Payandé (Trsp) y de los depósitos de Caliche (Tsc) que las cubre de manera discordante al noroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 765 662; Coord. Norte 2 032 812

Fotografía 24. Colinas residuales bajas con laderas cortas de pendientes empinadas en rocas blandas de la formación Saldaña (Trjs) al noroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Punto Control 857. Coord. Este 4 766 679; Coord. Norte 2 033 421

Fotografía 25. Lomas medias a bajas de laderas cortas superficies cóncavas-convexas en depósitos de Caliche (Tsc) cubriendo discordantemente a rocas de la formación Payandé (Trsp) al noroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 866

Fotografía 26. Morfologías onduladas a ligeramente planas representadas por la terraza aluvial antigua (Qt) del río Coello, parte central del título minero 745 de la mina La Esmeralda.

Fotografía 27. Geoformas asociadas a superficies de escarpes erosivos presentes en los depósitos de arenas puzolánicas (Qt) del área título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 765 749; Coord. Norte 2 032 463.

Fotografía 28. Generación de surcos de erosión afectando suelos de los depósitos cuaternarios (Qt) de arenas puzolánicas, PM1, título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 409; Coord. Norte 2 033 729.

Fotografía 29. Generación de surcos de erosión afectando las paredes verticalizadas de la mina de puzolanas, depósitos cuaternarios (Qt), PM2, título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 550; Coord. Norte 2 033 731.

Fotografía 30. Generación de cárcava y surcos de erosión afectando suelos de la formación Honda (Ngh) asociada a arcillolitas, PM3, título minero 6823, mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 260; Coord. Norte 2 033 548.

Fotografía 31. Erosión fluvial por socavación lateral margen izquierda del río Coello, afectando morfologías inclinadas en rocas calcáreas de la Formación Payandé (Trsp) y rocas asociadas a lutitas calcáreas de la Formación Saldaña (Trjs), PM4, adyacente al área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 072; Coord. Norte 2 033 901.

Fotografía 32. Generación de surcos de erosión afectando superficies que conforman la banda transportadora de la mina La Esmeralda en depósitos aluviales (Qal), PM5, título minero 745. Coord. Este 4 766 673; Coord. Norte 2 033 522

Fotografía 33. Generación de cárcava de erosión afectando suelos y rocas de la Formación Saldaña (Trjs), PM6, asociada a arcillolitas, PM3, título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 866

Fotografía 34. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, y reconocimiento en campo (PM7), donde se observa erosión por escorrentía superficial en épocas de lluvias generando surcos de longitudes cortas hasta 5 m sobre superficies desprovistas de vegetación en rocas arcillolíticas de la formación Honda (Ngh) al oeste del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 293; Coord. Norte 2 033 621

Fotografía 35. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, (PM8); se presenta erosión por escorrentía superficial con surcos de longitudes cortas hasta 10 m sobre coberturas desprovistas de vegetación en la unidad depósitos de Caliche (Tsc). Coord. Este 4 766 914; Coord. Norte 2 033 742.

Fotografía 36. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, (PM9); se presenta erosión fluvial por socavación lateral margen derecha del río Coello, en morfologías inclinadas asociadas a las rocas calcáreas de la Formación Payandé (Trsp). Coord. Este 4 766 606; Coord. Norte 2 034 115.

Fotografía 37. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, (PM10), se presenta erosión fluvial por socavación lateral margen derecha del río Coello, afectando morfologías inclinadas en rocas lutíticas y calcáreas de la Formación Saldaña (Trjs), al este del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 957; Coord. Norte 2 033 797.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Fotografía 38. Algunas de las especies de fauna registradas para el área de influencia Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 39. Superficies antrópicas.

Fotografía 40. Vista general de relieve en el área de influencia.

Fotografía 41. Vegetación del área de influencia.

Fotografía 42. Cuerpos de agua en el área de influencia.

Fotografía 43. Modificaciones antrópicas.

Fotografía 44. Ustic Haplustepts, representativo de la unidad cartográfica MWC

Fotografía 45. Typic Ustorthents de la unidad MWC

Fotografía 46. Afloramientos rocosos

Fotografía 47. Typic Ustorthents de la unidad MWD

Fotografía 48. Typic Haplustalfs de la unidad MWD

Fotografía 49. Tierras dedicadas a la ganadería con pastoreo extensivo

Fotografía 50. Zonas de extracción minera

Fotografía 51. FQ6 - Drenaje El Salado

Fotografía 52. FQ7 Afluente Zanjón Los Huilos

Fotografía 53. FQ8 Zanjón Los Huilos

Fotografía 54. FQ9 Pit de explotación

Fotografía 55. Río Coello

Fotografía 56. Recorrido 1

Fotografía 57. Recorrido 2

Fotografía 58. Recorrido 3

Fotografía 59. Recorrido 4

Fotografía 60. PTAP del corregimiento de Payandé

Fotografía 61. Río Coello aguas arriba Mina La Esmeralda

Fotografía 62. Río Coello aguas abajo Banda

Fotografía 63. Río Coello aguas abajo Puente via Payandé 1

Fotografía 64. Río Coello aguas abajo Puente via Payandé 2

Fotografía 65. Drenaje 1

Fotografía 66. Drenaje 2

Fotografía 67. Zanjón los Huilos

Fotografía 68. Drenaje El Salado

Fotografía 69. Medición del piezómetro PZ-05 sector pit sur mina La Esmeralda.

Fotografía 70. a.). Medición del piezómetro PZ-01. , b). Rocas de la formación Honda en el piezómetro PZ-01, sector pit sur mina La Esmeralda.

Fotografía 71. a.). Medición del piezómetro PZ-Escombrera Superior. , b). Morfología de la escombrera superior, sector occidental mina La Esmeralda.

Fotografía 72. Piezómetro 1 (PZM1) tipo tubo abierto.

Fotografía 73. Monitoreo y muestreo de Piezómetro 3 (PZM3) tipo tubo abierto.

Fotografía 74. Monitoreo y muestreo de Piezómetro 5 (PZM5) tipo tubo abierto.

Fotografía 75. Filtración 1 (INF1) al interior del Pit Calizas.

Fotografía 76. Filtración 2 (INF2) al interior del Pit Calizas..

Fotografía 77. Filtración 3 (INF3) al interior del Pit Calizas.

Fotografía 78. Estación QCAGAB, ubicada en la quebrada Chicalá aguas abajo, al suroeste del Pit Calizas.

Fotografía 79. Estación QA, ubicada en la quebrada Aguirre.

Fotografía 80. Estación DSAGAB, ubicada en el Drenaje El Salado aguas abajo.

Fotografía 81. Estación DSAGAR, ubicada aguas arriba del Drenaje El Salado.

Fotografía 82. Estación SSD en el Sistema de Salida de Descarga de agua del Pit Calizas. Izquierda: Sedimentador Descarga de Agua. Derecha: Caudalímetros donde se vierte agua del Pit Calizas hacia el Drenaje El Salado, durante el monitoreo el agua rebosó la poza de sedimentación.

Fotografía 83. Estación PL1, en el Pit Lake 1 en la parte central del Pit Calizas.

Fotografía 84. Estación PL2, en el Pit Lake 2 adyacente a la pared este del Pit Calizas.

Fotografía 85. Piezómetro 1

Fotografía 86. Piezómetro 3

Fotografía 87. Piezómetro 5

Fotografía 88. Piezómetro 7

Fotografía 89. Piezómetro 8

Fotografía 90. Piezómetro 9

Fotografía 91. Labores de exploración geotécnica área de influencia Mina Esmeralda.

Fotografía 92. Zona de extracción arenas puzolánicas (N:2 033587, E:4 766 578)

Fotografía 93. Procesos erosivos talud caliche, al costado noroeste de la escombrera superior.

Fotografía 94. Planta Caracolito

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

- Fotografía 95. Vía 1 punto 1a Entrada Mina Payandé
- Fotografía 96. Vía 1 punto 1b Entrada Mina Payandé
- Fotografía 97. Vía 2 punto 2 Entrada Payandé (La Virgen)
- Fotografía 98. Institución Educativa San Miguel Payandé
- Fotografía 99. Parque La Virgen Parte Alta
- Fotografía 100. Centro de Salud Payandé Serafín Montaña Cuellar
- Fotografía 101. Iglesia Santa Bárbara - Payandé
- Fotografía 102. Coliseo Payandé
- Fotografía 103. Parque Principal Payandé
- Fotografía 104. Club Campestre y Recreacional Chicalá
- Fotografía 105. Ancianato Hogar de Vida San Martín
- Fotografía 106. Casa Cultural Payandé
- Fotografía 107. Centro de Desarrollo Infantil Mi Bohío 2
- Fotografía 108. Institución Educativa San Miguel Payandé
- Fotografía 109. I.E. San Miguel (escuela)
- Fotografía 110. Cancha de Fútbol
- Fotografía 111. Cementerio Payandé
- Fotografía 112. Estación Policía Payandé
- Fotografía 113. Servicio de piscina
- Fotografía 114. Cancha Barrio Santa Bárbara

LISTA DE ECUACIONES

- Ecuación 1.
- Ecuación 2.
- Ecuación 3.
- Ecuación 4.
- Ecuación 5.
- Ecuación 6.
- Ecuación 7.

Ecuación 8.

Ecuación 9.

Ecuación 10.

Ecuación 11.

Ecuación 12.

Ecuación 13.

Ecuación 14.

Ecuación 15.

Ecuación 16.

Ecuación 17.

Ecuación 18.

Ecuación 19.

Ecuación 20.

Ecuación 21.

Ecuación 22.

Ecuación 23.

Ecuación 24.

Ecuación 25.

Ecuación 26.

Ecuación 27.

Ecuación 28.

Ecuación 29.

Ecuación 30.

Ecuación 31.

Ecuación 32.

Ecuación 33.

Ecuación 34.

Ecuación 35.

Ecuación 36.

Ecuación 37.

Ecuación 38.

Ecuación 39.

Ecuación 40.

Ecuación 41.

Ecuación 42.

Ecuación 43.

Ecuación 44.

Ecuación 45.

Ecuación 46. Presión atmosférica en el sitio de interés

Ecuación 47.

Ecuación 48.

Ecuación 49.

Ecuación 50.

Ecuación 51.

Ecuación 52.

Ecuación 53.

Ecuación 54.

Ecuación 55.

Ecuación 56.

Ecuación 57.

Ecuación 58.

Ecuación 59.

Ecuación 60.

Ecuación 61.

Ecuación 62.

5.1. MEDIO ABIÓTICO

5.1.1. Geología.

En este capítulo se aporta información cualitativa y cuantitativa que permita, en primera instancia, conocer el contexto tectónico regional y las características actuales del medio ambiente en el área de influencia del proyecto asociado a la explotación del yacimiento de calizas en el título minero 745. En concordancia con la definición de área de influencia cuyos criterios y consideraciones se describen en detalle en el Capítulo 4 del estudio de modificación, la caracterización geoambiental se ha elaborado tanto con información primaria, como con la información secundaria disponible. Para tal efecto, en cada ítem de la caracterización ambiental, se especifica el nivel de detalle obtenido para cada uno de los componentes.

Las consideraciones técnicas establecidas como parámetros para definir, identificar y delimitar el área de influencia del proyecto en esta etapa del estudio de modificación ambiental, se basan en los conceptos de medio y del componente Físico, determinados en los términos de referencia establecidos para la formulación de Estudios de Impacto Ambiental para Proyectos Mineros (Resolución 2206 del 27 de diciembre de 2016 de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA). El área de influencia del proyecto analizada, se ha considerado aquella donde se manifiestan los impactos directos generados por las actividades de desmonte y operación de la mina La Esmeralda y su infraestructura asociada para el Título Minero 0745-73

La definición del área de influencia preliminar para el componente Geoesférico, se determinó acorde con las actividades de desmonte, explotación proyectada y constructivas asociadas a la operación de la Mina La Esmeralda localizada en el corregimiento de Payandé municipio de San Luis (Departamento de Tolima) para el Título Minero 0745-73, el cual se ilustra su ubicación en la Figura 1.

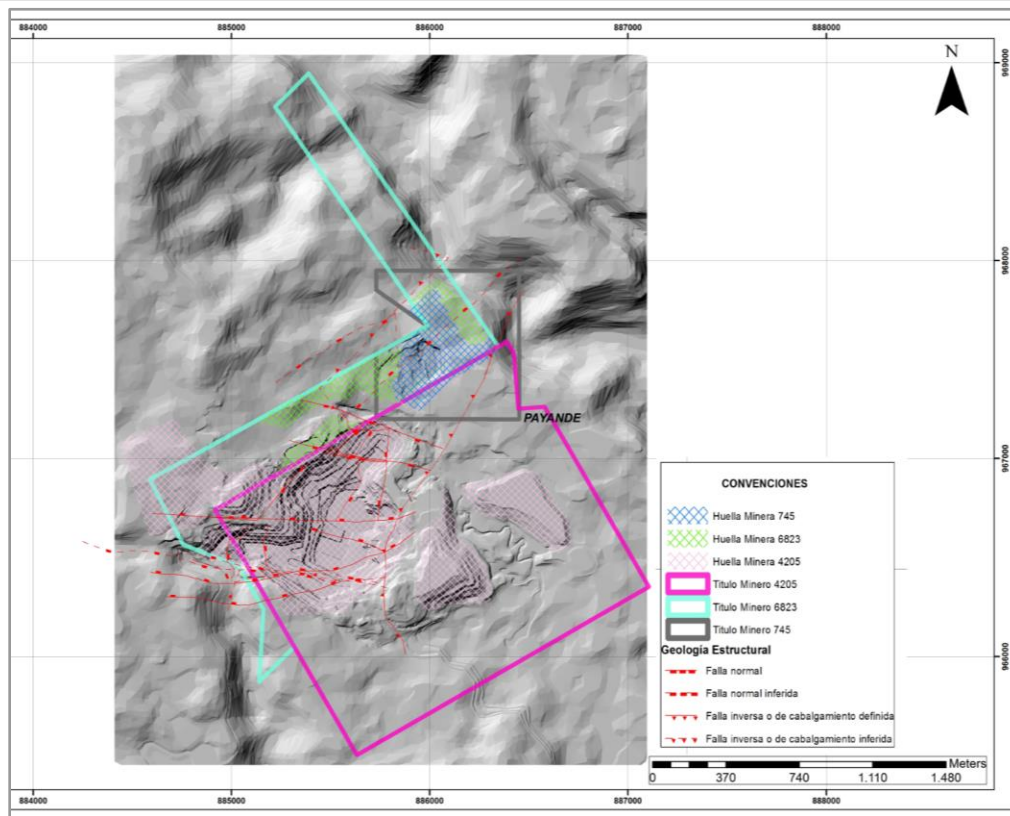


Figura 1. Huella área de intervención directa de título minero 0745 Mina La Esmeralda.

Fuente: Elaboración propia

Las características geológicas, geomorfológicas, estructurales e hidrogeológicas del área de influencia del componente geoesférico para 25 ha y 4 244 m² para el título minero 8-745, fueron definidas a partir de la compilación, análisis e integración de la información secundaria y primaria en el marco de la elaboración del estudio de modificación de la licencia ambiental de ambos proyectos. Como base fundamental a nivel del diseño minero se cuenta con el informe, Consideraciones de Explotación Minera Contrato de Concesión y del Programa De Trabajos Y Obras De Explotación - PTO para las Arenas Puzolánicas del Contrato de Concesión 8-745, ambos documentos propiedad de CEMEX Colombia, así como de la información oficial de la plancha geológica 245 (Girardot) del Servicio Geológico Colombiano (SGC) a escala 1:100.000, informes y reportes minero ambientales de la Mina La Esmeralda.

5.1.1.1. Geología regional.

El proyecto se encuentra a 166 km de distancia desde Bogotá D.C., (2.600 m.s.n.m.), saliendo por la autopista sur, conduciendo del municipio de Soacha (Cundinamarca) a Ibagué (Tolima) en dirección suroeste, tomando la vía 40, pasando por los municipios de Fusagasugá (Cundinamarca), Melgar (Tolima) que está a 323 m.s.n.m., donde se sigue en dirección oeste, se cruza el río Magdalena y continuando hasta el corregimiento de Gualanday (municipio de Coello, Tolima), donde se toma la vía 40 TLE (variante Ibagué – Armenia) durante 2,4 km hasta el retorno, se toma la salida que conduce vía Guamo – San Luis, y a 6,8 km se llega al corregimiento de Payandé. 300 m al noroeste de Payandé está la entrada a la mina La Esmeralda.

Se presenta la descripción del marco tectónico y la estratigrafía a nivel regional, con base en la información oficial disponible del Servicio Geológico Colombiano - SGC y otros estudios en la zona, la cual ha sido complementada con datos obtenidos a partir de campañas de exploración directa y el respectivo control de campo.

5.1.1.1.1. Marco Tectónico Regional

El contexto tectónico regional del área de influencia del proyecto, se ubica en la depresión geomorfológica del Valle Superior del Magdalena (VSM), la cual se extiende desde Pitalito hasta Honda, separa las Cordilleras Central y Oriental de Colombia. Se trata de una franja baja, bien marcada delimitada por fallas inversas, orográficamente continua, pero con marcadas diferencias en la estratigrafía y en la tectónica, cuya evolución se remonta a los comienzos del Mesozoico y que ha pasado por diversas etapas deformativas, principalmente de tipo distensivo durante el Mesozoico, y de tipo compresivo durante el Cenozoico¹.

El límite entre el Valle Superior (VSM) y el Valle Medio (VMM), se registra de acuerdo con el SGC (2011), en el tramo comprendido entre un poco al norte de Girardot y la ciudad de Honda, y ha de estar marcado por elementos estructurales (e.g. Falla de Cambao-Falla de Ibagué, Línea Guataquí-Piedras) y/o diferencias en el tipo y edad del basamento económico. El VSM se caracteriza por un estilo estructural compresivo, de cabalgamiento plegamiento, que afecta por igual ambos costados del mismo, con transporte tectónico opuesto y convergente hacia el centro del valle, y con desplazamientos que pueden alcanzar decenas de kilómetros a lo largo de múltiples superficies de despegue localizadas dentro de las unidades más blandas e incompetentes de la cobertera sedimentaria (e.g., Grupos Villeta y Guaduas). Se forman así abanicos tectónicos imbricados, unas veces con escamación gruesa y nucleados por basamento, otras veces con escamación delgada que no afecta el basamento Precretácico².

El inicio de la cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM) se da durante el Jurásico-Triásico y es originada por los procesos de apertura de la cuenca y de levantamiento de las cordilleras Central y Oriental, lo que ha permitido la depositación de sedimentos desde el Mesozoico hasta el Terciario, depósitos que han sido afectados por fallas y pliegues que dan forma a la cuenca.

Durante el primer periodo del Mesozoico se depositan sedimentos continentales y los esfuerzos extensionales producen fallas normales, una mega cuenca de apertura y vulcanismo al que se le asocian intrusiones. Estos esfuerzos continúan en el segundo y tercer periodo de esta Era, caracterizando el Cretácico por depósitos de origen marino que sufren dos etapas de máxima inundación durante el Albiano temprano y el Turoniano y una pequeña etapa regresiva durante el Albiano Medio.

Al final del Cretácico el levantamiento de la cordillera Central genera regresiones del mar, permitiendo la depositación de sedimentos de transición hasta el pulso más importante de la cordillera central, esto ocurre inclusive a principios del Cenozoico, provocando un periodo de no depositación y dando origen a fallas inversas y pliegues asociados, que se desarrollan al mismo tiempo que ocurre la depositación de sedimentos de ambiente continental.

Al final del Paleógeno y principios del Neógeno existe una breve trasgresión del mar y se levanta la cordillera oriental, debido a la orogenia Andina que además invierte las fallas normales, genera fallas inversas, cinturones plegados y el continuo levantamiento de las cordilleras Oriental y Central. Durante el Neógeno y cuaternario continúa la depositación de sedimentos de ambientes continentales.

La cuenca está rodeada por fallas importantes como Algeciras-Garzón y Bituima-La Salina y las cordilleras Central y Oriental. Sus sedimentos están depositados sobre un basamento cristalino que ha sufrido metamorfismo de alto y bajo grado, en medio de los diferentes procesos de extensión y compresión que han intervenido en la evolución de la cuenca.

¹ Mojica J. Franco R. 1990. Estructura y evolución tectónica del Valle Superior del Magdalena. Boletín Geología Colombiana.

² Lozano E. Zamora N. 2014. Anexo Compilación Valle Superior del Magdalena. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá. 2014.

En el marco geológico regional, el área de la mina La Esmeralda está localizada entre el flanco oriental de la Cordillera Central y el Valle del Rio Magdalena. Afloran unidades del triásico, jurásico, neógeno y sedimentos cuaternarios, en un piedemonte afectado por fallas inversas, las cuales se localizan en la transición del Flanco Oriental de la Cordillera Central, así como de los Valles Superior y Medio del Magdalena, Figura 2 y Figura 3.

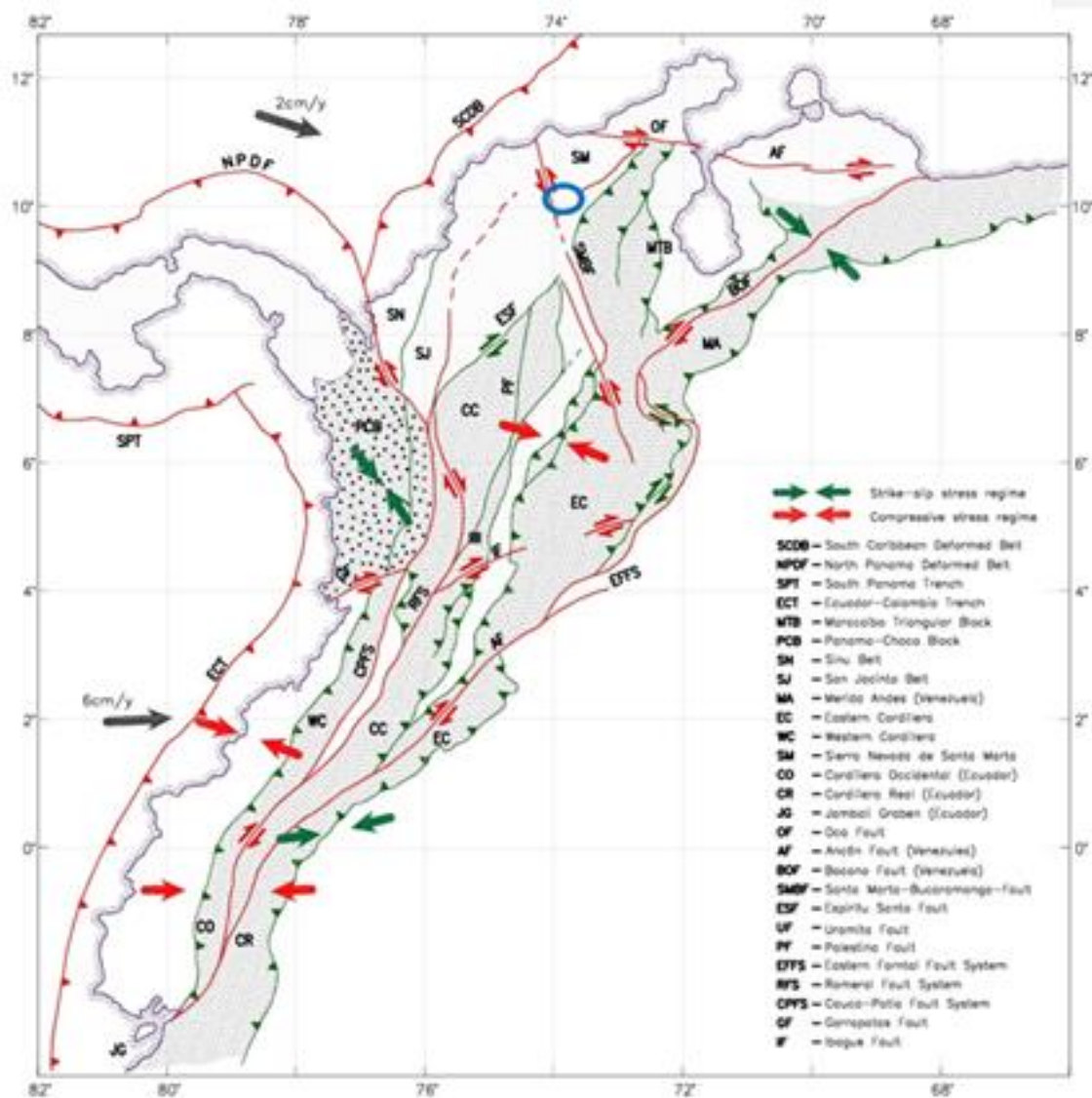


Figura 2. Marco tectónico regional. En el esquema se resaltan las estructuras más importantes
Fuente: Tomado y adaptado del Mapa de fallas activas de Colombia. Montes y Sandoval, 2001

Las estructuras originadas en el basamento, y que presentan expresión en la cobertura sedimentaria meso - cenozoica, muestran dos direcciones longitudinales preferenciales (noroeste-suroeste y norte sur) y una dirección transversal (noroeste- sureste); estas direcciones según el SGC, está controlando otro estilo estructural importante en el Valle Superior del Magdalena, el cual correspondería al fallamiento y plegamiento "en echelon", el cual es común en la mayoría de las cadenas plegadas cabalgantes (Mojica & Franco, 1990).

Las evidencias a nivel regional reflejan una transpresión, la cual, generó cuatro bloques inclinados hacia el sureste, con disposición "en echelon". Estos bloques estarían delimitados por fallas inversas o de cabalgamiento, las cuales

posiblemente fueron normales en el basamento y sufrieron una reactivación, e invirtieron su movimiento. Estas fallas estarían representadas en superficie por los sistemas de fallas de Agua de Dios, La Mata, Cambao y Otú - Pericos.

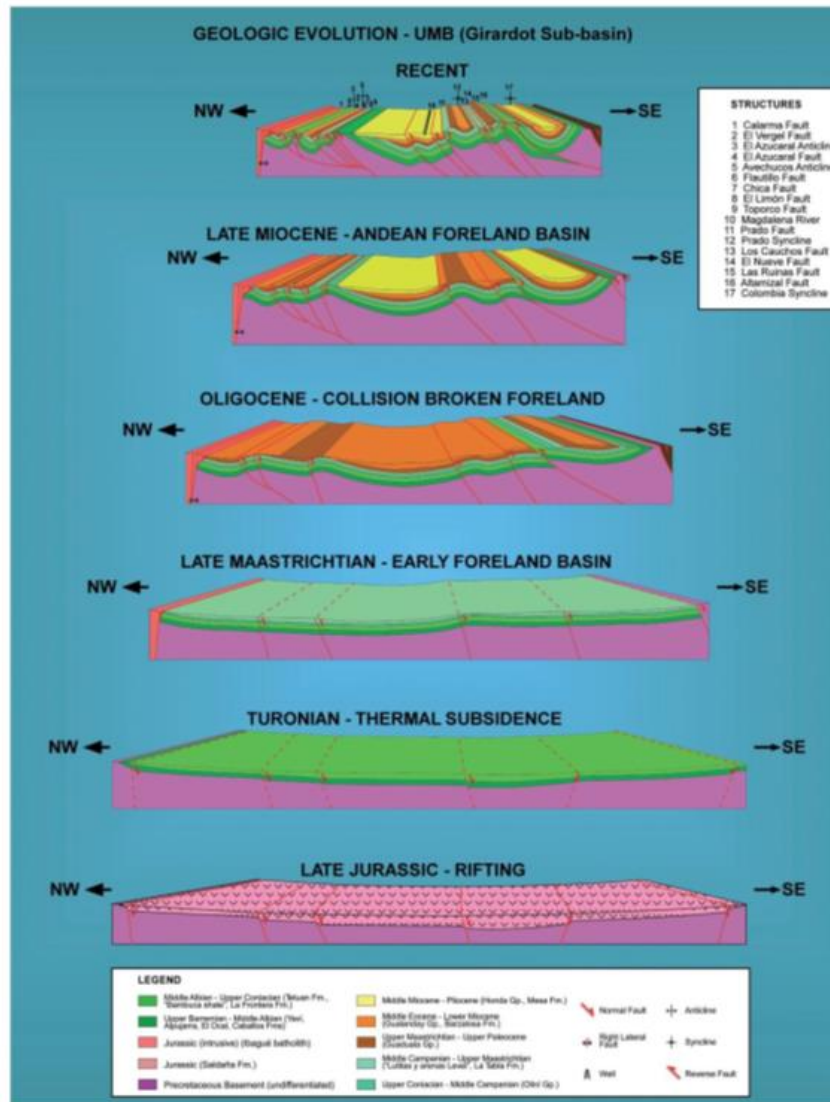


Figura 3. Modelo integrado de evolución tectónica del VSM. Muestra el desarrollo de las fallas y estructuras que caracterizan la cuenca del VSM.

Fuente: Roncancio & Martínez, 2011, en Lozano E. Zamora N. 2014. Anexo Compilación Valle Superior del Magdalena.

La inversión de fallas preexistentes también llevó a que en el occidente de la región, rocas sedimentarias cretácicas, cabalgaran sobre rocas de la Cordillera Central, y originan estructuras dúplex, como las presentes en otros frentes montañosos (Acosta, 1995).

Un nuevo pulso transpresivo afecta principalmente la Cordillera Central, y hace que una parte del Batolito de Ibagué se desplace hacia el nororienté, a lo largo de la Falla de Ibagué y que su prolongación más oriental cabalque sobre rocas neógenas. La Falla de Ibagué, corresponde a una falla de rumbo dextral, con actividad neotectónica que se puede seguir

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

por una longitud de 190 km, con una dirección promedio N75°E, desde el Municipio de Tuluá (Valle del Cauca), y atraviesa la ciudad de Ibagué, hasta el río Magdalena, donde cambia su dirección hacia el norte³.

En el Eoceno medio, se inicia la sedimentación de depósitos de abanicos aluviales y ríos trenzados, que rellenaron discordantemente la cuenca generada por tectónica compresiva producida por cinturones de cabalgamiento. Las rocas que se produjeron son levemente plegadas y falladas, en el Oligoceno(?), y originan, en el suroriente, el sistema de fallas de Agua de Dios, que corta la Formación Barzalosa y, a su vez, generan, hacia el oriente, una cuenca donde se depositan los conglomerados de Carmen de Apicalá. A principios del Mioceno se inicia una época de producción de vulcanismo alcalino (van Houten & Travis, 1968) en la Cordillera Central, la cual produjo gran cantidad de material depositado en ríos meandriformes del Grupo Honda, los cuales rellenaron los valles existentes en ese momento, y fosilizaron algunas de las fallas existentes; estas fallas fueron reactivadas posteriormente durante el levantamiento más intenso de la Cordillera Oriental (finales del Neógeno)⁴.

Durante el Cuaternario se depositaron conos de deyección, los cuales fueron en su mayoría generados en diversos eventos de actividad del volcán Nevado del Tolima y rellenaron una paleotopografía deprimida, generada al sur del Batolito de Ibagué, en un proceso de "pulsos" sucesivos. Los productos resultantes se desplazaron utilizando el cauce del río Combeima. También, diversos eventos de actividad del volcán Cerro Machín generaron otros depósitos como los abanicos de Espinal y Guamo, que cubren el abanico de Ibagué y los cuales se pueden apreciar a lo largo del río Coello y en la carretera Buenos Aires - Payandé. Finalmente, los ríos han acumulado depósitos aluviales y modelado terrazas a lo largo de sus cauces, que se exponen en el relieve actual.

5.1.1.1.2. Estratigrafía

En el marco geológico regional, el área de la mina La Esmeralda se ubica entre el flanco oriental de la Cordillera Central y el Valle del Río Magdalena. Afloran unidades del triásico, jurásico, neógeno y sedimentos cuaternarios, en un piedemonte afectado por fallas inversas, las cuales se localizan en la transición del Flanco Oriental de la Cordillera Central, así como de los Valles Superior y Medio del Magdalena, Figura 2.

A continuación se describen la estratigrafía de las unidades, en un orden cronológico y secuencial asociada al contexto regional donde se ubican los títulos mineros 6823, 8-745 y 4205 que integran la Mina La Esmeralda y hacen parte del contexto geológico regional analizado y expone las condiciones sobre las cuales se enmarca el yacimiento de interés del título minero 745.

³ Acosta J. et al. 2002. Memoria geológica explicativa plancha 245 - Girardot. INGEOMINAS.

⁴ Ibid.

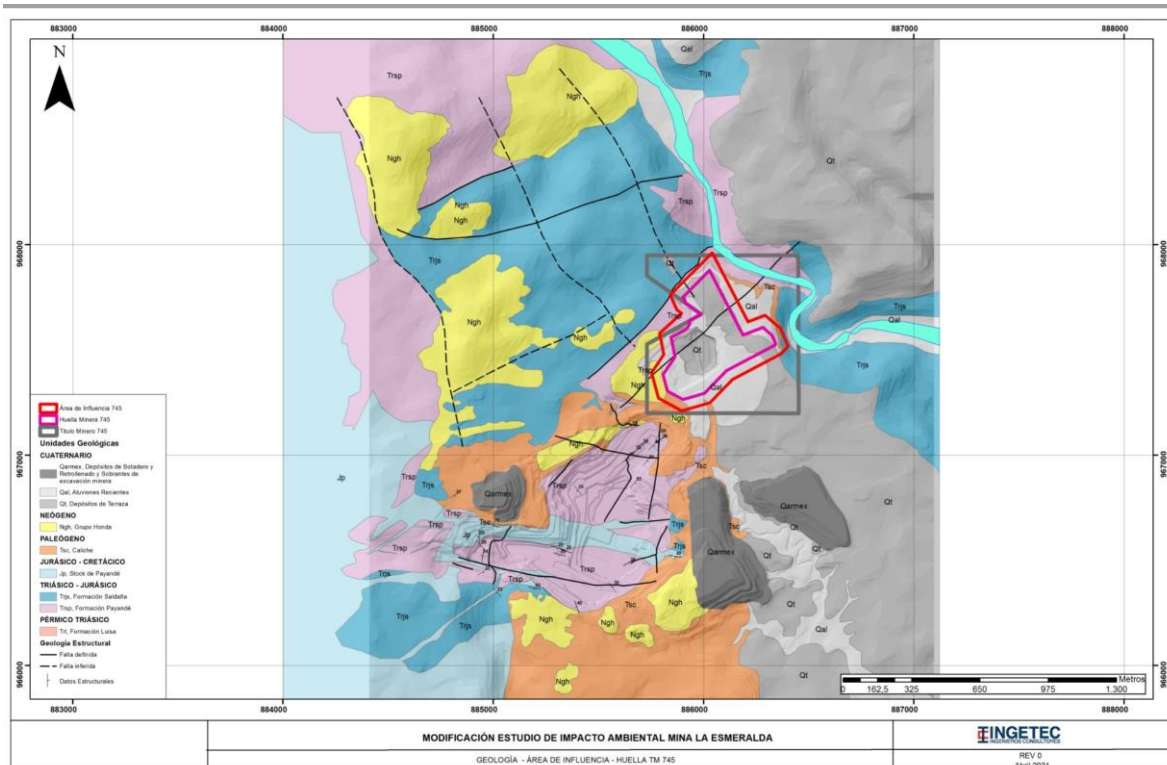


Figura 4. Unidades geológicas asociadas para el título minero 8-745 Mina La Esmeralda
Fuente: Adaptado y modificado de CEMEX, 2020

5.1.1.1.2.1. Triásico.

- Formación Payandé (Trp).

Unidad constituida por una secuencia calcárea marina, conformada por intercalaciones de caliza de grano medio a grueso de color gris claro a medio, dispuestas en capas tabulares con espesores decimétricos a métricos, con laminación interna. Hacia el sector occidental del área de estudio, ocurren localmente calizas marmorizadas por metamorfismo de contacto asociado con el Stock de Payandé. La unidad se encuentra intruída por diques de pórfidos gris verdosos, que ocasionan metamorfismo de contacto. En varios sectores, el contacto con el Stock de Payandé es fallado o discordante. Se estima un espesor de 280 m.

Esta unidad infrayace la Formación Saldaña y en algunos sectores por fuera del título minero 745, se encuentra en contacto discordante con los depósitos cuaternarios recientes. Ver Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001.

De acuerdo con correlaciones bioestratigráficas se concluye que esta formación se depositó durante el triásico tardío. (INGEOMINAS, 2002). Esta unidad en términos de paleoambiente, representa una sedimentación marina de aguas cálidas y someras, en paleoambientes de infralitoral hasta litoral.

- **Formación Saldaña (Trs).**

Se localiza al suroeste de Payandé y está conformada en la base de intercalaciones de vulcanitas y tobas con capas de arenitas, calizas y calizas arenosas; y en la parte superior por intercalaciones de lutitas calcáreas, areniscas, conglomerados, limolitas y en menor proporción, vulcanitas y tobas, Figura 2. En cercanías al cuerpo intrusivo, la unidad se encuentra silicificada y en ocasiones marmorizada.

La unidad en el contexto regional puede alcanzar los 250 m de espesor, se reportan dos segmentos diferenciables, en la parte inferior, se intercalan vulcanitas y tobas con capas de arenitas, calizas y calizas arenosas; y una parte superior, se intercalan areniscas, conglomerados, limolitas y, en menor proporción, vulcanitas y tobas. Ver CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002. Los materiales de esta unidad geológica no serán intervenidos por las actividades proyectadas en el plan minero del título 745.

La Formación Saldaña, se presenta de manera discontinua, especialmente hacia el extremo oriental, dónde está cubierta (en contacto discordante) por las unidades paleógenas y neógenas y materiales cuaternarios del abanico de Ibagué (Qal-Qt), Plano CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001.

5.1.1.1.2.2. *Jurásico.*

- **Stock de Payandé (Jgp).**

Este cuerpo intrusivo aflora hacia la zona central y occidental del área de influencia, consiste en una cuarzodiorita a granodiorita, grano medio y color gris claro; intruye las rocas más antiguas generando metamorfismo de contacto. Constituye gran parte de la microcuenca alta de la quebrada Chicalá y parte del drenaje El Salado. Los efectos más notorios se presentan en la Formación Payandé, en la cual ocasionó marmorización y aureolas de skarn. Afectan las Unidades pre cretáceas, siguiendo direcciones preferenciales de diaclasamiento, especialmente con orientación E – W.

La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001. No hace parte de las unidades geológicas a intervenir por las actividades proyectadas en el plan minero del título 745.

5.1.1.1.2.3. *Neógeno*

- **Grupo Honda (Tsh).**

Aflora al oriente de Payandé, se presenta como parches aislados y discontinuos. El SGC ha dividido la unidad en dos miembros: (i) el inferior consta de capas gruesas de arenitas conglomeráticas, verdes amarillas, feldespáticas y líticas, con cantos de andesita y rocas metamórficos con mucha mica, a veces calcáreas, con alto contenido de minerales pesados; intercaladas ocurren capas delgadas a medias de lodolitas rojas a abigarradas, las cuales forman pequeños valles. (ii) El nivel superior se encuentra representado por una sucesión alternante, más marcada, de areniscas cuarzo feldespáticas, de grano medio a conglomeráticas, verdes, amarillas, micáceas, algo calcáreas, con cantos de andesitas, en capas gruesas, con estratificación cruzada tangencial de bajo ángulo, intercalados con capas gruesas de arcillolitas físeles, abigarradas. En este nivel es común encontrar niveles de concreciones de arenita bastante calcárea. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Las rocas del Grupo Honda generalmente se encuentran cubiertas por depósitos cuaternarios. El límite superior es discordante bajo los depósitos cuaternarios del Abanico de Espinal y el Guamo. En el área de influencia del título minero estos depósitos están definidos en la cartografía geológica de detalle como Qt y Qal.

- Depósito de Caliche (Tsc).

Se distribuye sobre la zona central de las operaciones mineras de la mina La Esmeralda. Se ha catalogado como un depósito continental, conformado por fragmentos de caliza, limolitas y granodiorita envueltos en una matriz arcillosa, enriquecida en carbonatos provenientes de la disolución de las calizas de la Formación Payandé. Localmente y hacia el sector occidental, el caliche se enriquece en fragmentos de rocas intrusivas, areniscas y conglomerados, provenientes de la erosión del Stock de Payandé y la Formación Luisa.

Suprayace discordantemente las formaciones Pre Cretáceas y la Formación Honda. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001 y su distribución vertical se ilustra en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002.

5.1.1.1.2.4. Cuaternario.

- Abanico de Ibagué (Qfvi).

Se presenta al norte y oriente de Payandé sobre las márgenes del río Coello, es un depósito fluvio volcánico constituido hacia la base por cantos, clastos guijarros y bloques de carácter polimíctico, envueltos en una matriz areno arcillosa. Hacia la parte superior de la secuencia fluvio volcánica, ocurre un depósito horizontal heterogéneo constituido principalmente por tobas que contienen niveles de arenas puzolánicas al sur y occidente de la población de Payandé.

Esta unidad define los depósitos de puzolana, los cuales están constituidos por dos niveles; (i) el nivel superior predominantemente arenoso, el nivel intermedio de carácter puzolánico, compuesto por niveles de pumita de diferente espesor, y (ii) el nivel inferior de carácter andesítico constituido por material arenoso y abundantes fragmentos angulares de andesita, granodiorita y esquistos de tamaño variable. El espesor establecido para el Abanico de Ibagué es de 140 m. El nivel de arenas puzolánicas alcanza un espesor variable entre 20 a 25 m, ver Figura 5; Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001.

- Cuaternario Aluvial (Qal).

Se distribuye por el sector oriental del área, particularmente sobre la vertiente del drenaje El Salado. Está conformado por aluviones de carácter arenoso con clastos angulosos de tamaño variable. Los clastos están constituidos por fragmentos de caliza, limolita, granodiorita, areniscas conglomeráticas, soportados por una matriz arenosa de color crema y pardo. Los depósitos aluviales forman una topografía plana disectada por las corrientes de agua. Su espesor es de hasta 10 m. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001.

- Depósitos de escombros y materiales sobrantes de las excavaciones mineras - Qa-rmex

Dentro del contexto regional del proyecto del título minero 745, se presentan al sur del área de influencia los depósitos antrópicos asociados a las zonas de disposición de escombros y sobrantes de las excavaciones mineras. Constituyen superficies perfiladas con morfología ondulada, con geometría aterrazada y bermas reconformadas revegetalizadas en la parte este del título minero 4205 principalmente. Corresponde a coberturas de materiales con morfología ondulada, perfilada y aterrazada que cubren áreas dispersas alrededor del PIT minero de la Mina La Esmeralda actualmente asociadas al TM 4205 que involucran depósitos de escombros (Qa-rmex). Incluyen una mezcla de materiales de estériles

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

producto del proceso de explotación donde la fracción gruesa lo componen gravas de rocas sedimentarias y volcanosedimentarias; la granulometría de los tamaños granulares que van desde gránulos hasta bloques (2mm >15 cm de diámetro), de formas subangulares a angulares, inmersos en una matriz fino granular de materiales finos como arenas y limos. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001.

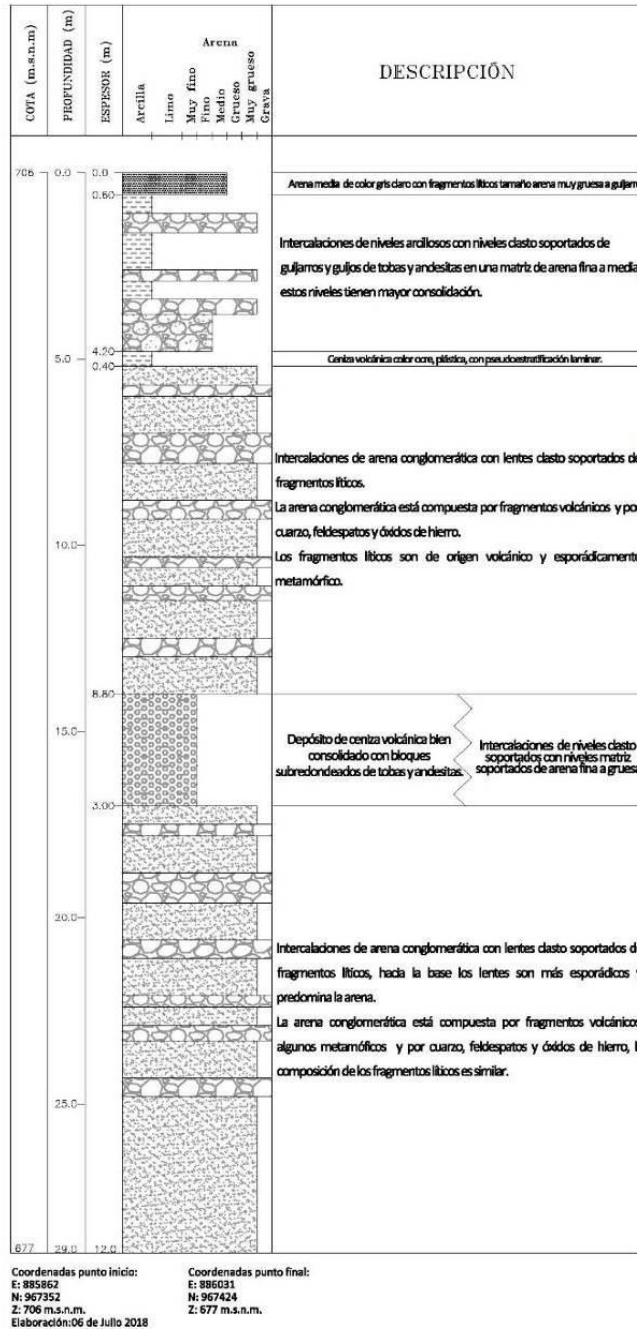


Figura 5. Columna estratigráfica arenas de puzolanas asociados a los depósitos cuaternarios, yacimiento de interés del título minero 745 mina La Esmeralda
Fuente: CEMEX Colombia en GYG, 2019

Era	Periodo	Epoca/Serie	Edad/Etapa	Unidad
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno		Aluviones Recientes
		Pleistoceno	Superior	
	Neógeno	Plioceno	Piacecenziano	Grupo Honda
			Zanclaeno	
		mioceno	Messiniano	
			Tortoniano	
			Serravaliano	
			Langhiano	
			Burdigaliano	
	Aquitania no			
Paleógeno	Oligoceno	Chatiano		
MESOZOICO	Cretácico	Tardío		
		Temprano		
	Jurásico	Tardío	Tithoniano	Stock de Payandé
			Kimmeridgiano	
			Oxfordiano	
		Medio		
		Temprano	Toarciano	Formación Saldaña
	Pliensbachiano			
	Sinemuriano			
	Hettangiano			
Rhaetiano				
Triásico	Tardío	Noriano	Formación Payandé	
		Carniano		

Figura 6. Cronoestratigrafía generalizada del contexto geológico del proyecto
Fuente: INGEOMINAS, 2002

5.1.1.2. Geología del Yacimiento título minero 745

El área de influencia que conforma el aprovechamiento de las arenas de puzolanas en la mina La Esmeralda de CEMEX S.A, se localiza en la parte media-baja de la cuenca del río Coello, parte del piedemonte oriental de la Cordillera Central, en el municipio de San Luis, corregimiento de Payandé, departamento del Tolima. El marco geológico del yacimiento del título minero 745, se emplaza principalmente sobre unidades cuaternarias de los depósitos fluvio volcánicos que en la cartografía de detalle del proyecto relaciona los depósitos aluviales recientes (Qal) y los depósitos de morfología de terrazas (Qt); las arenas puzolánicas se concentran como la unidad de interés en los depósitos de morfología de terrazas (Qt).

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

El yacimiento cobre de manera discordante morfologías onduladas e inclinadas en rocas neógenas de la formación Honda (Ngh) y de los depósitos de Caliche del Paleógeno (Tsc). Finalmente, rocas de edad triásico constituyen el basamento del área de influencia, incluye las formaciones Saldaña (Trjs) de origen volcano-sedimentario y de la formación Payandé (Trsp).

El modelo geológico de superficie y del subsuelo del yacimiento, se sustenta en los resultados de los estudios previos, reconocimiento en campo, exploraciones geotécnicas, que han permitido establecer la distribución de las unidades en planta y a nivel vertical, diferenciando las unidades de roca, suelos y coberturas cuaternarias que hacen parte del área de influencia del proyecto; los puntos de control geológico efectuados en la visita de campo en el mes de septiembre de 2020, se relacionan en la Tabla 1, y se muestran en la Figura 7.

El modelo geológico de superficie diferencia las unidades litológicas aflorantes en el área del título minero 745, y se presentan en el plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001; el modelo geológico del subsuelo que ilustra la variación lateral y vertical del yacimiento se muestra en las secciones geológicas de detalle para el área de influencia del componente en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002, con su huella de intervención y los puntos de control de campo, Figura 7.

Tabla 1. Relación de puntos de control geológico durante la visita de reconocimiento área de influencia título minero 745 mina La Esmeralda.

Punto de Control	Coordenadas Magna Sirgas Origen Bogotá		Coordenadas Origen Único Nacional	
	Este	Norte	Este	Norte
824	885 880	967 120	4766408,205	2033266,823
825	885 836	967 338	4766364,525	2033484,823
826	885 883	967 583	4766411,857	2033729,687
831	885 735	967 402	4766263,644	2033548,947
832	885 890	967 308	4766418,467	2033454,755
833	885 866	967 191	4766394,309	2033337,823
834	886 024	967 585	4766552,819	2033731,487
835	885 866	967 698	4766395,024	2033844,678
836	885 949	967 654	4766477,938	2033800,573
837	886 189	967 517	4766717,676	2033663,274
838	886 212	967 508	4766740,657	2033654,244
839	886 275	967 508	4766803,639	2033654,155
840	886 304	967 532	4766832,664	2033678,107
841	886 292	967 669	4766820,861	2033815,085
842	886 296	967 700	4766824,904	2033846,07
843	886 332	967 784	4766861,012	2033929,995
844	886 352	967 794	4766881,02	2033939,964
845	886 357	967 798	4766886,025	2033943,956

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Punto de Control	Coordenadas Magna Sirgas Origen Bogotá		Coordenadas Origen Único Nacional	
	Este	Norte	Este	Norte
846	886 361	967 775	4766889,991	2033920,957
847	886 386	967 706	4766914,886	2033851,941
848	886 486	967 720	4767014,877	2033865,796
849	886 506	967 747	4767034,91	2033892,76
850	886 292	967 714	4766820,925	2033860,072
851	885 851	967 743	4766380,092	2033889,686
852	885 814	967 720	4766343,07	2033866,745
853	885 814	967 751	4766343,114	2033897,736
854	885 822	967 828	4766351,22	2033974,703
855	886 147	967 376	4766675,489	2033522,373
856	886 169	967 260	4766697,319	2033406,376
857	886 151	967 275	4766679,346	2033421,397
870	886 113	967 512	4766641,691	2033658,382
871	886 313	967 531	4766841,66	2033677,095
872	886 090	967 280	4766618,37	2033426,481

Fuente: Elaboración propia.

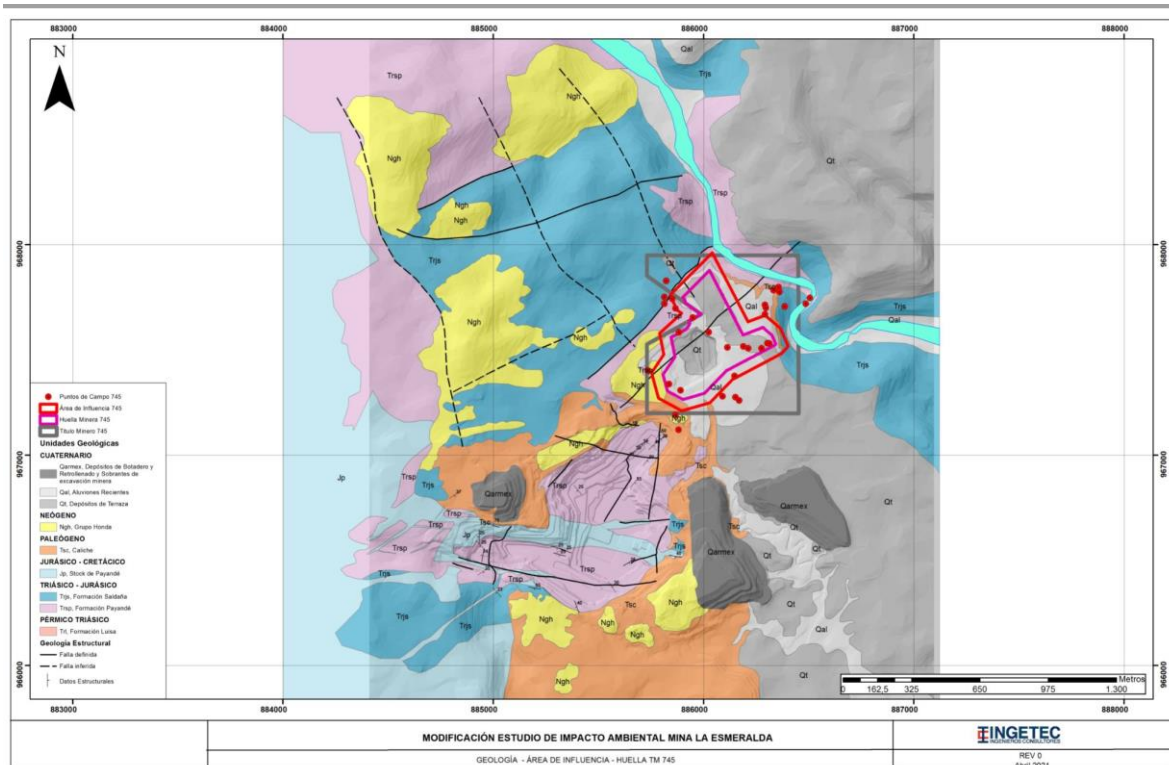


Figura 7. Mapa geológico del área de influencia y distribución de los puntos de control en campo título minero 745 de la mina La Esmeralda a escala 1:5000.
Tomado de CEMEX S.A y Modificado INGETEC, 2020.

5.1.1.2.1. Trabajos de exploración geológica del subsuelo

La evaluación del yacimiento, obedece a los resultados de las diversas campañas de exploración geológico geotécnica que se han ejecutado en el área del proyecto, ver Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001. El proceso metodológico se valida y se incluyen en la interpretación del modelo geológico, los sondeos con recuperación de núcleo con sus respectivos análisis químicos, que además soportan el planeamiento minero proyectado a 20 años para la explotación de las calizas con base en la modelación geológica del cuerpo mineralizado.

Dentro del contrato de concesión minera se realizaron perforaciones con recuperación de testigo, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.003. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002.

En el año 1999, el área de materias primas de Cemex, excavó tres trincheras con el fin de determinar los espesores del descapote y así poder definir el cálculo de reservas, sin embargo posteriormente se realizó una campaña de perforaciones con recuperación de núcleo para evaluar los títulos 8-4205, 6823 y 8-74573, donde en este último el cual es objeto de interés de este documento, se ubicaron 12 perforaciones:

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

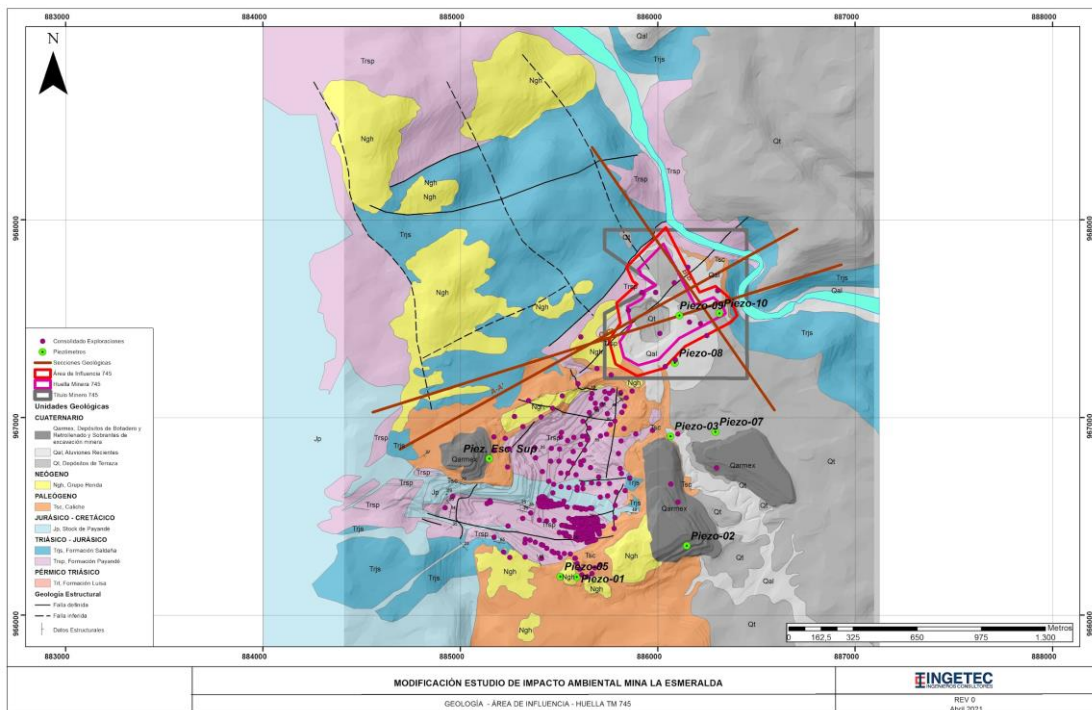


Figura 8. Ubicación de perforaciones exploratorias en el contrato de concesión 745-73.

Fuente: elaboración propia, con datos exploraciones en Informe de monitoreo geotécnico 2018. Minería y Geotecnia

Se han realizado diversas campañas exploratorias a lo largo de la vida del proyecto minero dentro y fuera del área de influencia, cuya ubicación y profundidades se relaciona a continuación y se ilustra en la Figura 22.

Tabla 2. Sondeos exploratorios campañas del subsuelo

ID Sondeo	Coord. Y Origen Único	Coord. X Origen Único
P-26	2033906,34	4766682,08
P-27	2033787,79	4766831,25
P-25	2033827,38	4766612,47
P-22	2033779,80	4766518,15
P-24A	2033779,56	4766447,69
P-24	2033778,42	4766447,92
P-20	2033689,39	4766380,02
P-21	2033628,58	4766688,93
P-28	2033621,43	4766745,10
P-28A	2033560,87	4766776,53
P-19	2033571,94	4766538,62
PERF5-07	2033555,12	4766138,69
PERF6-07	2033438,31	4766617,56

ID Sondeo	Coord. Y Origen Único	Coord. X Origen Único
P-29	2033403,69	4766565,47
PERF7-07	2033394,91	4766220,45
P-06	2033280,28	4766398,07
P-14	2033269,59	4766282,39
P-03	2033243,47	4766189,31
PERF4-07	2033166,60	4766273,10
P-02	2033072,85	4766039,95
PERF3-07	2032989,99	4765775,48
P-13	2033052,74	4766162,81
P-05	2033062,52	4766268,57
P-09	2033064,16	4766415,84
P-08	2033082,13	4766500,76
PERF9-07	2033063,43	4766628,55
P-11	2032923,40	4766137,33
PERF8-07	2032908,11	4766138,96
P-04	2032893,75	4766186,96
P-10	2032864,03	4766343,82
P-07	2032841,16	4766385,41
P-01	2032873,97	4765942,72
P-12	2032809,43	4766000,28
P-32	2032787,67	4766147,86
P-32	2032780,80	4766118,73
P-34	2032746,63	4765948,49
P-34	2032730,72	4765951,48
P-33	2032685,78	4766135,93
P-33	2032683,27	4766139,35
P-15	2032644,05	4766209,41
P-17	2032664,64	4765883,39
P-31	2032727,48	4765676,43
P-31	2032727,48	4765676,43
P-31	2032718,65	4765679,28
P-18	2032711,97	4765662,14
P-30	2032750,32	4765488,44
P-30	2032692,16	4765450,21
P-23	2032599,36	4765767,99
PERF1-07	2032467,33	4765745,94

ID Sondeo	Coord. Y Origen Único	Coord. X Origen Único
P-16	2032602.65	4766040,30
PERF2-07	2032439.59	4766032,15

Fuente. Informe de monitoreo geotécnico 2018. Minería y Geotecnia; Modelo Hidrogeológico Conceptual Mina La Esmeralda 2019

5.1.1.2.2. Estratigrafía del yacimiento

Se describen las características geológicas en un orden cronológico desde la unidad más reciente a la más antigua, aflorantes en el título minero 745 del área de influencia, de acuerdo con la información de referencia disponible, estudios de campo y análisis de petrografía que sustentan el modelo geológico de detalle. Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001 al CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.003. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002.

En el área donde se contempla la explotación del yacimiento asociado al título minero 745, afloran rocas sedimentarias cretácicas, como se mencionó incluye la Formación Payandé y Saldaña, intruidas localmente por diques de granodiorita y andesita de espesor variable como las unidades más antiguas. Sobre estas Formaciones suprayacen areniscas conglomeráticas y lodolitas que corresponden a la Formación Honda de edad neógena, así como depósitos Cuaternarios de Caliche. Al norte y noreste del área de la mina, se encuentran depósitos aluviales del Cuaternario, conformados por materiales de origen fluvio volcánico, ricos en arena y pómez (puzolanas) de 20 a 25 m de espesor, que corresponde a la unidad de interés minero.

Las puzolanas son depósitos del cuaternario, heterogéneos, compuestos principalmente por tobas, que fueron depositadas en los flancos de los conos volcánicos de la cordillera central y luego transportadas en forma de avalanchas por los ríos Combeima y Coello, formando lo que se conoce en el contexto geológico regional como Abanico de Ibagué.

5.1.1.2.2.1. Cuaternario

- Depósitos aluviales (Qal)

Esta unidad se distribuye en un 20,2% del área del título minero 745 abarcando los taludes expuestos que conforma los primeros 5 m de la mina de puzolanas, (Fotografía 1). Esta unidad cuaternaria se encuentra representada por gravas de rocas volcánicas, extrusivas y sedimentarias principalmente, de tonalidades intermedias a oscuras, formas subredondeadas a redondeadas, de tamaños heterométricos, mal seleccionados, en una matriz de arenas finas a medias con esporádicas arcillas, de carácter matriz soportado, en una relación que varía entre 80-20% y 70-30% con bajo contenido de materia orgánica (Fotografía 2). Los clastos presentan baja esfericidad, la matriz presenta tonalidades amarillentas a café claro, suelta y seca. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001; Figura 227.



Fotografía 1. Depósitos aluviales (Qal) cubriendo de manera discordante los depósitos de arenas puzolánicas, sobre el punto de control 834, mina de puzolanas. Coord. Este 4 766 552; Coord. Norte 2 033 731.
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 2. Depósitos aluviales (Qal), sobre el punto de control 832, matriz soportados, con un espesor de 4 m, adyacente mina de puzolanas. Coord. Este 4 766 418; Coord. Norte 2 033 454.
Fuente: Elaboración propia.

- Depósitos aluviales de morfología de terraza (Qt)

Depósitos cuaternarios areno gravosos y gravosos en profundidad que abarcan un 36,74% del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda y que en su parte media está representado por la mina de arenas puzolánicas. En esta zona de

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

la mina de puzolanas, estos depósitos se encuentran constituidos de base a techo por una secuencia de sedimentos arenosos, de grano medio a grueso, con líticos oscuros volcánicos, esporádicos limos, fragmentos subredondeados de pumitas y piroclastos de tonalidades marrón claro a grisáceo de tamaños gránulos a guijos, de carácter matriz soportado, en una relación 80 – 20%, húmedos y que tienden a ser sueltos, como se observan en los puntos de control 825, 826 (Fotografía 3), 837, 838, 839 y 840. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001; Figura 227.



Fotografía 3. Depósitos aluviales de morfología de terrazas (Qt) asociado a arenas medias a gruesas con gravas de rocas volcánicas, intrusivas y sedimentarias principalmente, de formas subredondeadas, conformando la mina de puzolanas, punto de control 826. Coord. Este 4 766 411; Coord. Norte 2 033 729.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las exploraciones ejecutadas por la Empresa Colombiana de Hidrogeología SAS para el año 2017, en el área del título minero 745 con la instalación de piezómetros P8, P9 y P10, se registra que entre los 4 o 6 m de profundidad afloran arenas cuarzosas de grano medio a grueso, con fragmentos y gravas de rocas volcánicas, intrusivas y fragmentos líticos oscuros, de rocas ígneas y metamórficas, algunos con presencia de rocas sedimentarias, limos y ceniza volcánica, como se puede ver en la Figura 9.

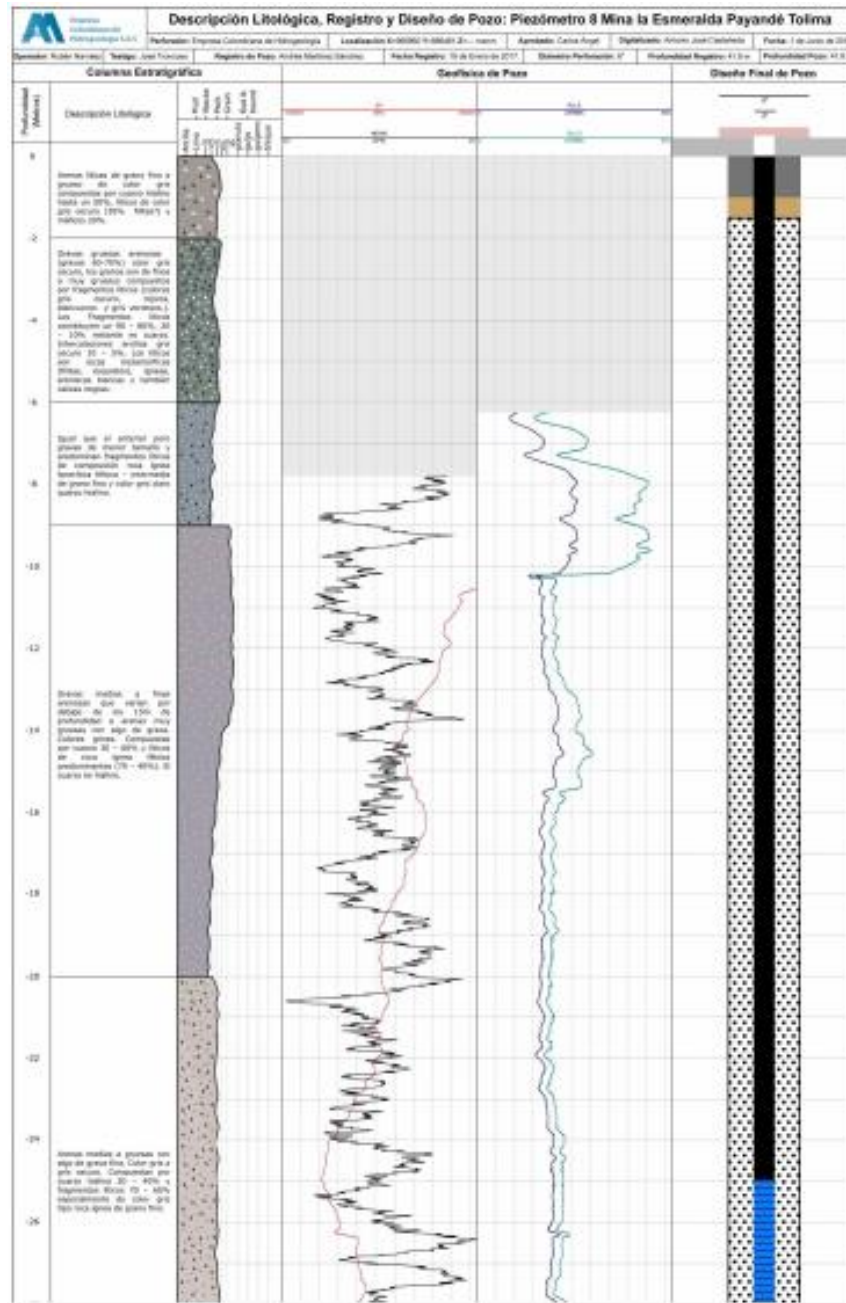


Figura 9. Descripción litológica del piezómetro ejecutado P8 en el área sur del título minero 745 mina La Esmeralda. Fuente: Informe de perforación y pruebas Slug para seis piezómetros. Empresa Colombiana de Hidrogeología SAS, 2018.

El yacimiento de puzolanas del título minero 745, se encuentra al sur del río Coello confinado en los 30 m superiores de las zonas planas, es de carácter subhorizontal y reposa sobre una paleotopografía labrada sobre los sedimentos pre cretácicos del Grupo Payandé y depósitos calcáreos terciarios denominados Caliche. Según la columna estratigráfica local del yacimiento, éste se puede dividir en tres niveles:

- Nivel de descapote: Corresponde al nivel superior, está compuesto por un material arenoso con abundantes fragmentos de roca de diámetro variable, de tamaño de grava y bloques de roca como andesitas, esquistos y

granodioritas. La topografía que se presenta en el área es suave, se puede estimar un nivel de descapote entre dos y seis cm de espesor.

- Nivel pumítico: Corresponde al material puzolánico con espesor mayor a 10 m, compuesto de lentes pumíticos con variaciones según el porcentaje de arena presente; encontrándose en algunos lentes, rocas en baja proporción. El diámetro de la pumita puede ser desde 1 o 2 cm hasta 20 cm, son generalmente redondeados de color amarillo pálido a blanco, con aspecto poroso.
- Nivel andesítico: Nivel inferior, compuesto por material arenoso con abundantes fragmentos de roca de carácter angular, de diámetro variable, tamaño grava, de fragmentos de andesita, granodiorita y esquistos.

Teniendo en cuenta la información recolectada a partir de las perforaciones y la cartografía de superficie se ha actualizado el modelo geológico para el proyecto minero La Esmeralda, comprendido entre los títulos 8-4205 ,6823 y 8-745 para obtener un modelo completo para los yacimientos que finalmente hacen parte de la mina. El modelo geológico, integra secciones geológicas del subsuelo, construidas a partir de los resultados de las exploraciones geotécnicas de las perforaciones ejecutadas dentro y por fuera del área de influencia, con las cuales se verifica y valida el espesor de cada uno de los materiales de interés involucrados en el contrato de concesión 0745, Figura 16 a la Figura 18. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001.

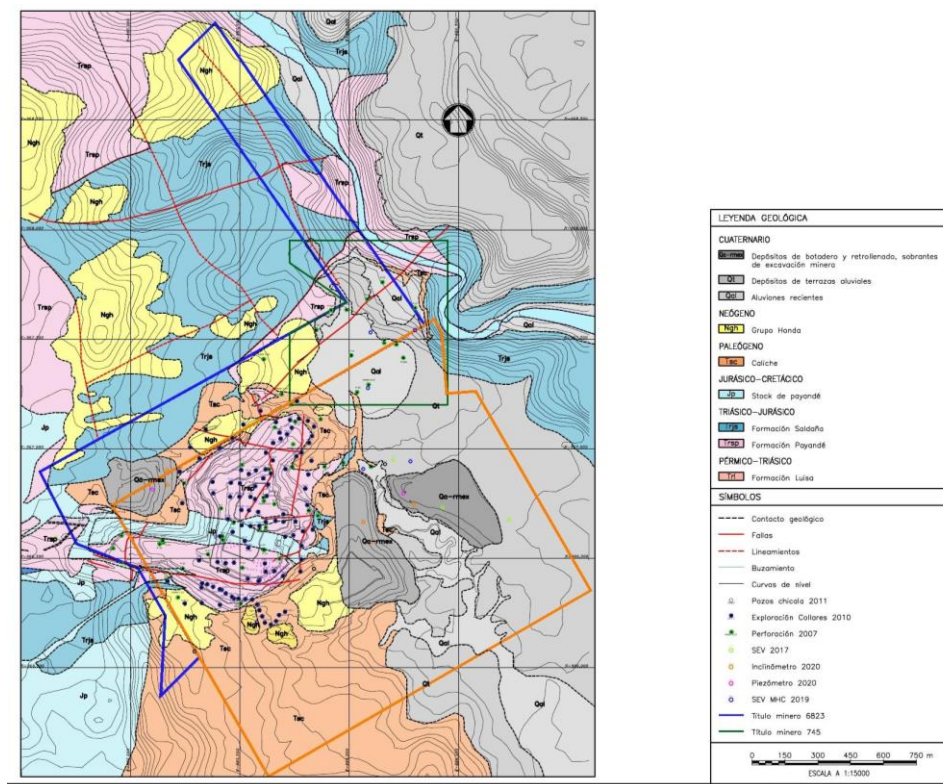


Figura 10. Planta geológica del TM 745 (polígono en verde) actualizada al año 2020.

Fuente: Elaboración propia

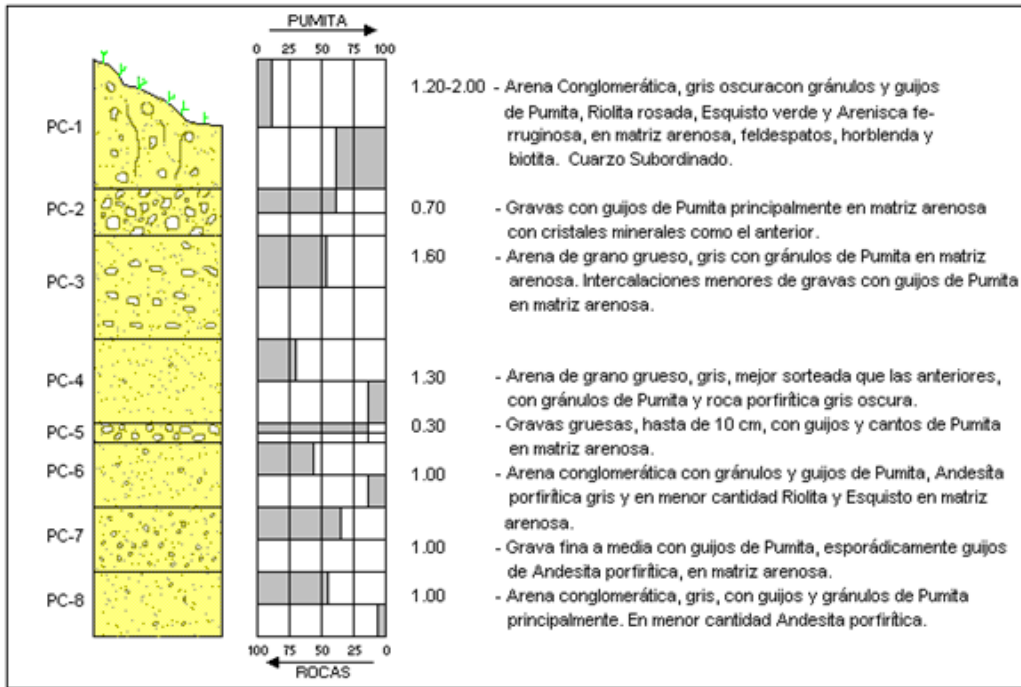


Figura 11. Columna litológica nivel de descapote del yacimiento de Arenas Puzolánicas, TM 745. Mina La Esmeralda. Fuente: Adaptado y tomado Informe Geología y Geotecnia ICA II, CEMEX 2019

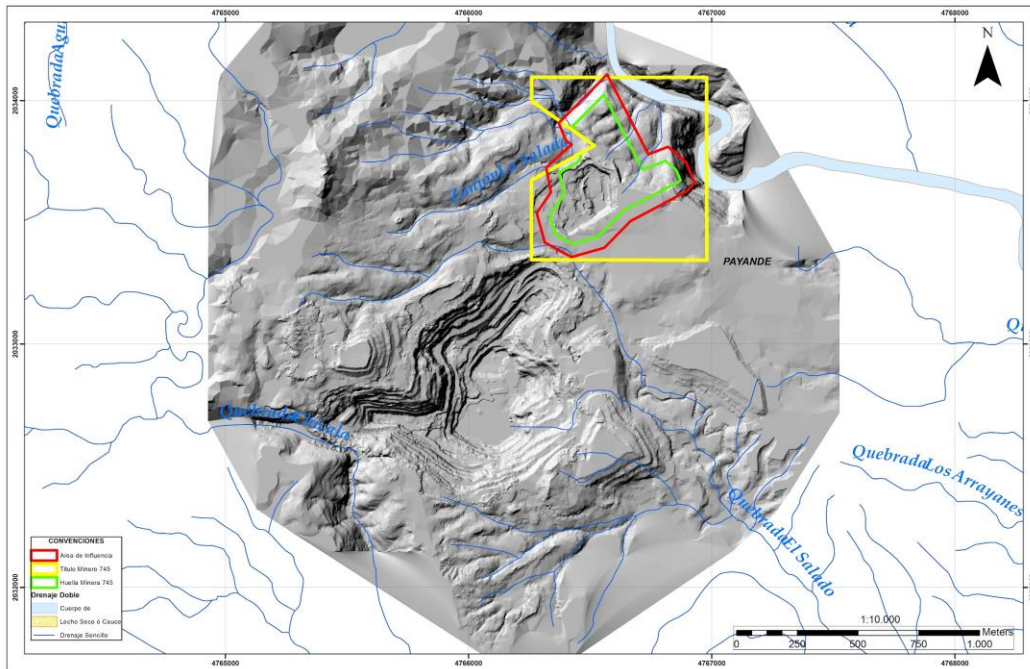


Figura 12. Modelo de elevación del terreno con base en el levantamiento topográfico al 2019, en amarillo el TM 745 y en rojo la huella de intervención directa según la secuencia minera proyectada. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al modelo geológico minero del yacimiento, para evaluar la distribución de las reservas y definir el planeamiento minero del yacimiento de puzolanas, fue elaborado por la firma Complexus en el 2011, usando el software minero Geovia

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Surpac, Figura 19 y Figura 20. El cálculo de recursos y reservas para yacimiento de puzolanas asociado al contrato de concesión 0745 está definido de acuerdo a la evaluación minera consignada en el PTO aprobado por la ANM en el año 2003 literal 3.2.1⁵. La estimación de las reservas mineras incorpora la información geológica existente para la fecha de la evaluación, cuya modelación proyectada corresponde a un modelo de bloques, el cual puede verificarse en el PTO para el contrato de concesión 0745-73 literal 3.2.1 y se ilustra en la Figura 13 a la Figura 15.

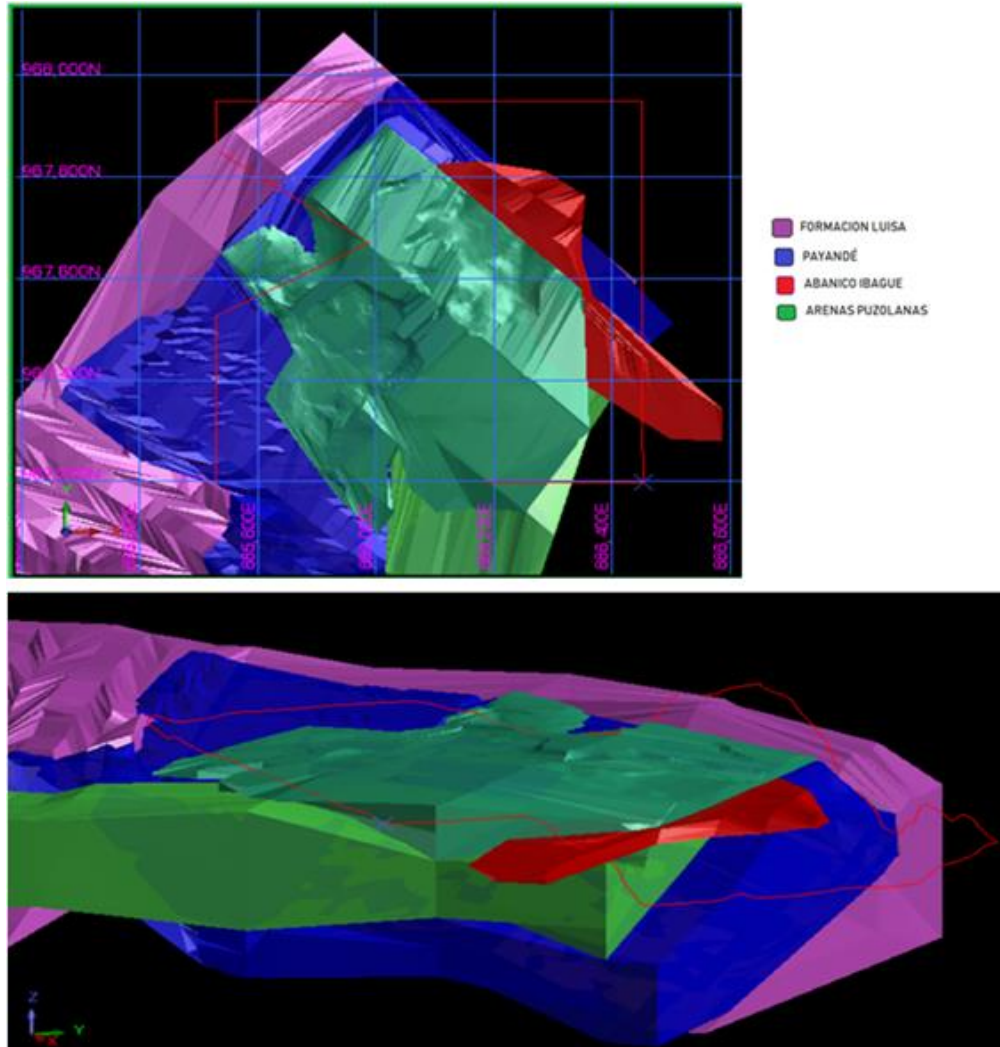


Figura 13. Modelo geológico del contrato de concesión 0745-73.
Fuente: mb- complexus 2011 Geovia_Surpac en PTO, 2008

⁵ PTO Contrato de concesión 0745-73 yacimiento arenas de puzolanas. CEMEX. 2003.

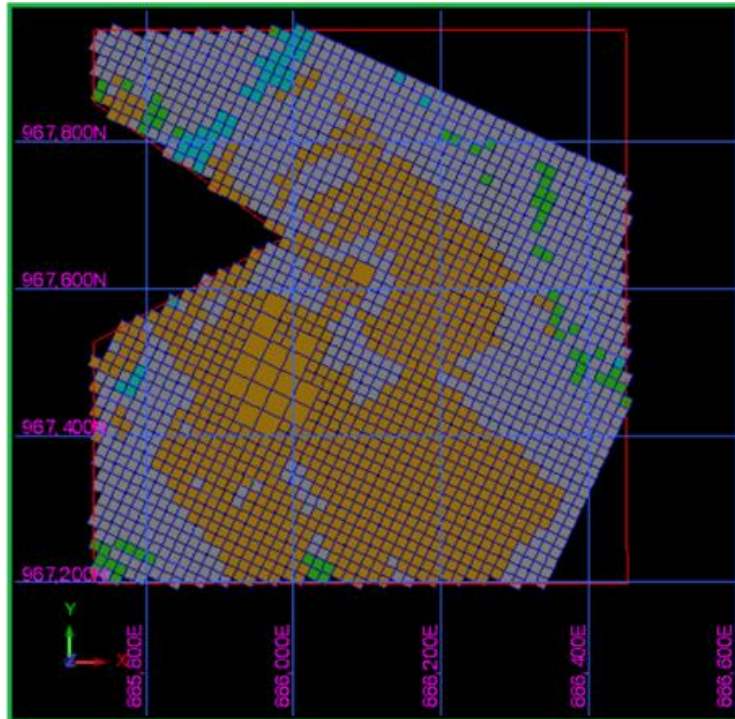


Figura 14. Modelo de bloques contrato de concesión 0745. Fuente: PTO, 2008
Fuente: PTO, 2008

La estimación de recursos y reservas del material de interés del título 745 involucra el análisis geoestadístico en cada unidad litológica de interés, formulado un modelo de bloques con tamaño de bloque 15m x15mx10m en el diseño y planeamiento minero del yacimiento, ver Figura 15.

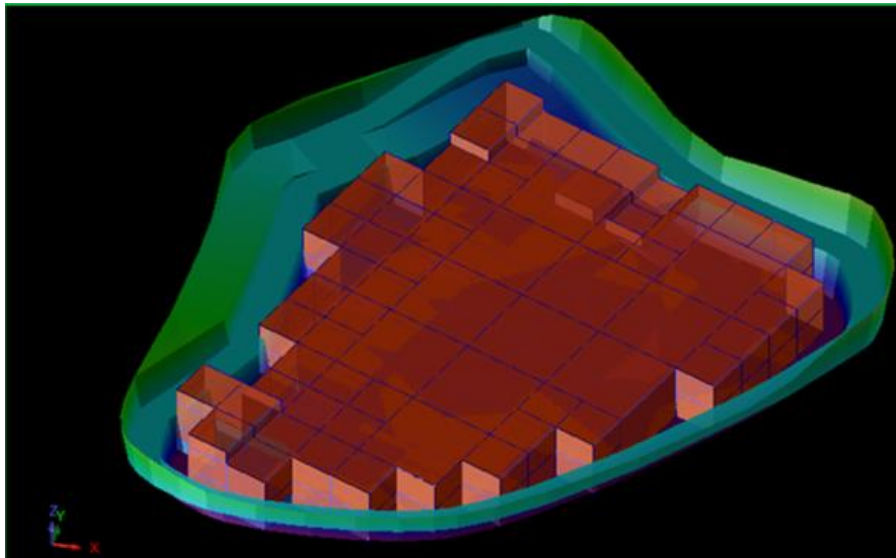


Figura 15. Modelo tridimensional que ilustra la distribución de las reservas probadas y pit de explotación del contrato de concesión 0745.

Fuente: PTO, 2008

Se reporta un millón de toneladas de reservas probadas para el título 0745-73. El reporte está actualizado al mes de junio de 2019, Tabla 3 y Tabla 4:

Tabla 3. Reporte de reservas probadas contrato 745

Tipo de roca	Volumen	Toneladas	Densidad (Tn/m3)
Puzolana	571 500	1 028 700	1,8

Fuente: CEMEX. Actualización PTO TM 745. (2019).

Tabla 4. Resumen categorización Recursos y Reservas – contrato de concesión 745

Recursos y reservas	Tipo yacimiento	Volumen (m3)	Toneladas	Densidad (TM/m3)
Medidas	Puzolana	8 541 000	15 373 800	1,8
Probables	Puzolana	4 612 500	8 302 500	1,8
Probadas	Puzolana	571 500	1 028 700	1,8

Fuente: CEMEX. Actualización PTO TM 745. (2019).

5.1.1.2.2.2. Neógeno

- Formación Honda (Ngh)

Esta unidad litológica aflora al oeste y suroeste del polígono del título minero 745 de la mina La Esmeralda, con una distribución de 3,22% del área en cuestión. En general, se encuentra conformada por arcillolitas violáceas con concreciones arenosas de grano fino en la base (Fotografía 4) y hacia el techo de la unidad afloran areniscas y niveles de arenitas de grano medio a conglomerático, con algunos segmentos milimétricos conglomeráticos (Fotografía 5); estos segmentos están constituidos por gravas tamaños gránulos hasta guijos de rocas de variada composición, en especial, rocas volcánicas, ígneas y sedimentarias de tonalidades intermedias a oscuras, con procesos de oxidación por los tonos rojizos en algunos casos. Estas rocas se presentan secas, muy alteradas y meteorizadas, con un perfil IIA de rocas meteorizadas (Deere & Patton, 1971), como los evidenciados en los puntos de control 831 y 833 (ver plano geológico del área título minero 745 mina La Esmeralda). Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001; Figura 227.



Fotografía 4. Arcillolitas violáceas con concreciones arenosas de grano fino ligeramente calcáreas haciendo parte del punto de control 831 al suroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 263; Coord. Norte 2 033 548.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 5. Areniscas de grano medio a conglomerático y capas delgadas de conglomerados en matriz areno-arcillosa con gravas tamaños gránulos de rocas de variada composición de formas subredondeadas a subangulares en el punto de control 833 al sur del polígono 745 y título de explotación actual 4205 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 263; Coord. Norte 2 033 548.

Fuente: Elaboración propia.

Esta unidad litológica dentro del área de estudio se encuentra cubriendo de manera discordante a los depósitos de Caliche (Tsc) de edad paleógeno.

- Depósitos de Caliche (Tsc)

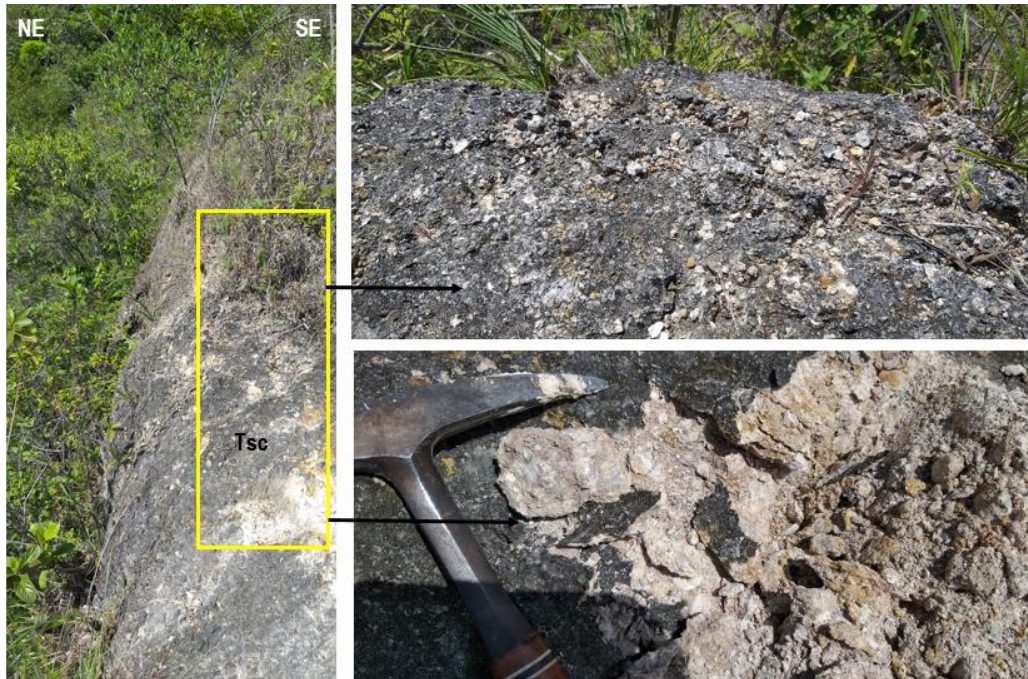
Unidad litológica distribuida en un 2,51% al noreste y suroeste del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Teniendo en cuenta su origen de depósito continental, se encuentra conformado por fragmentos de calizas de tonalidades grisáceas oscura a claro, limolitas, areniscas, y esporádicos fragmentos de granodiorita rosada, con procesos de oxidación, envueltos en una matriz arcillosa y con carbonatos producto de la disolución de rocas calcáreas de la Formación Payandé, generando una costra dura carbonatada, que en presencia de agua se evidencia la erosión y disolución de sus carbonatos. En general estos depósitos presentan un espesor medio de hasta 15 m cubriendo de manera discordante a las rocas de la Formación Payandé, como los observados en los puntos de control 824 (Fotografía 6), 833, 844 (Fotografía 7) y 845. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001; Figura 227.



Fotografía 6. Morfologías colinadas de los depósitos de Caliche (Tsc) cubriendo de manera discordante a rocas calcáreas de las formación Payandé (Trsp) en el área del título minero 745 con vista al W desde el punto de control 824. Coord. Este 4 766 408; Coord. Norte 2 033 266.

Fuente: Elaboración propia.

A nivel estructural, el área del título minero 745 se presenta disectado por la traza de una falla normal de dirección SW – NE que inicia en la zona de contacto del título minero actual de explotación 4205 y que continúa hacia el noreste cubierta por los depósitos cuaternarios de origen aluvial de la cuenca del río Coello. También se reconocen zonas con microplegamientos en rocas de la formación Saldaña; en general, el basamento que conforma el título minero posee un rumbo de sus capas al NW y buzamientos al NE hasta la cuenca del río Coello en su margen izquierda, ya en su margen derecha se evidenció un cambio de su rumbo al NE y buzamientos al NW por el contacto fallado entre rocas de la formación Saldaña (Trjs) y Payandé (Trsp), como se puede ver en la Fotografía 22.



Fotografía 7. Textura amorfa de los depósitos de Caliche (Tsc), fragmentos de calizas grisáceas, limolitas y esporádicas areniscas envueltos en una matriz de carbonatos precipitados, cubren de manera discordante rocas calcáreas de la Formación Payandé (Trsp) en el área del título minero 745, punto de control 844. Coord. Este 4 766 881; Coord. Norte 2 033 940.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2.2.3. Triásico

- Formación Saldaña (Trjs)

Unidad litológica que aflora al noroeste y noreste del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda, con una distribución del 0,85% de dicha área. Al noreste del área del título minero, esta unidad de origen volcano sedimentario se encuentra constituida por lutitas violáceas rojizas, presencia de carbonatos, zonas oxidadas, alteradas y meteorizadas, con partición en cubos por el intenso fracturamiento, deleznales, secas como las observadas en el punto de control 852 (Fotografía 8). Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001.

En esta misma zona, sobre el punto de control 853, ver Fotografía 9, se presentan areniscas de grano fino violáceas a rojizas, con esporádicos líticos oscuros, ligeramente calcáreas, alteradas, meteorizadas y con procesos de oxidación; finalmente sobre el punto de control 854 en el Zanjón Los Huilos se observan areniscas ligeramente calcáreas de tonalidades violáceas, con procesos de oxidación con esporádicas capas medianas de calizas grisáceas arenosas de grano fino, meteorizadas, fracturadas y cortadas por diques de textura afanítica microcristalina de tonalidades gris verdoso oscuro, de composición intermedia a básica, con espesor de 30 cm cortando de manera casi ortogonal estas rocas de la formación Saldaña (Fotografía 10). Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001; Figura 227.



Fotografía 8. Lutitas de tonos violáceos calcáreas con líticos oscuros volcánicos de la Formación Saldaña (Trjs), meteorizadas y muy fracturadas, adyacente al área del título minero 745 punto de control 852. Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 866.
Fuente: Elaboración propia.

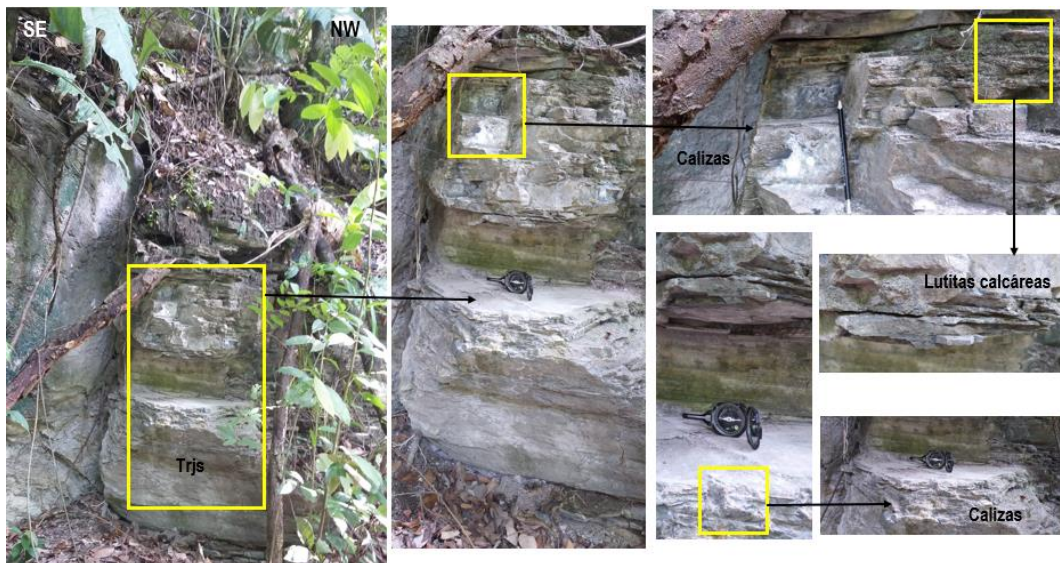


Fotografía 9. Areniscas de grano fino ligeramente calcáreas, líticos oscuros, de tonos rojizos de la Formación Saldaña (Trjs), meteorizadas y fracturadas, adyacente al área del título minero 745 punto de control 853. .Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 897.
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 10. Calizas arenosas de grano fino grisáceas con esporádicas venillas de carbonatos, líticos oscuros, cortadas por diques afaníticos de composición andesítica de tonos gris verdoso oscuro, de la Formación Saldaña (Trjs), adyacente al área del título minero 745 punto de control 854. Coord. Este 4 766 351; Coord. Norte 2 033 974. Fuente: Elaboración propia.

Hacia el noreste del área del título minero y sobre la cuenca del río Coello, estas rocas se encuentran formando los escarpes verticalizados en este valle encañonado: se encuentran asociadas a la presencia de lutitas ligeramente calcáreas de tonalidades gris claro, limolitas grisáceas laminadas, con intercalaciones de calizas grises oscuras masivas y duras, en capas delgadas entre 15 y 25 cm de espesor, algunas venillas de carbonatos cortando la estratificación y un perfil IIB de rocas moderadamente meteorizadas, como se puede observar en los puntos de control 846 y 847, Fotografía 11.



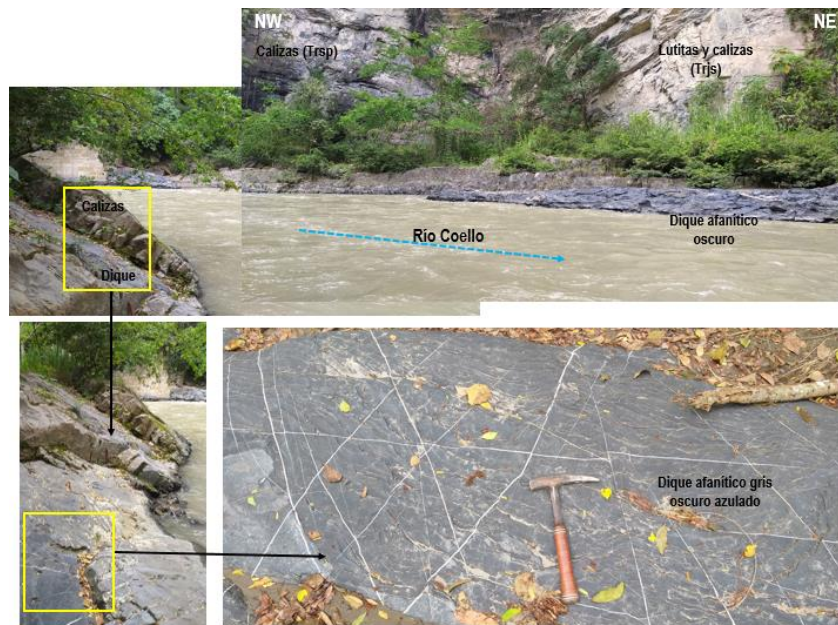
Fotografía 11. Intercalaciones de lutitas calcáreas grisáceas laminadas con calizas gris claro alteradas, meteorizadas de la Formación Saldaña (Trjs), en el área del título minero 745, punto de control 847. Coord. Este 4 766 914; Coord. Norte 2 033 851. Fuente: Elaboración propia.

En la margen izquierda del río Coello, se presenta el contacto fallado entre las calizas de la formación Payandé (Trsp) y las lutitas calcáreas y calizas de la formación Saldaña (Trjs), Fotografía 12; en particular, en ambas márgenes y el lecho del río, se evidenció un dique que corta ambas unidades, de manera casi ortogonal a la estratificación, de textura afanítica, composición máfica, tonalidades gris oscuro verdoso, con una red de venillas de carbonatos entre sí, como se puede ver en el punto de control 849, Fotografía 13.



Fotografía 12. Vista al Este desde el punto de control 848, donde se presenta contacto fallado entre las unidades calizas de la Formación Payandé (Trsp) izquierda y rocas de la Formación Saldaña (Trjs) derecha, en la cuenca del río Coello. Coord. Este 4 767 014; Coord. Norte 2 033 865.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 13. Márgenes del río Coello mostrando el dique afanítico gris azulado que intruye las dos unidades triásicas asociadas a las formaciones Payandé (Trsp) y Saldaña (Trjs), sobre el punto de control 849, al NE del área del título 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 034; Coord. Norte 2 033 892.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los análisis petrográficos efectuado sobre muestras de roca de la formación Saldaña (Trjs) en el área de estudio, como en el caso de la muestra LCPG-01, de una arenisca de grano fino con carbonatos, madura texturalmente, compuesta principalmente por cuarzo monocristalino, feldespato potásico y plagioclasas en una matriz arcillosa, donde el material cementante es carbonatos, además de venillas, epidota en venillas diseminados en la matriz, y opacos (asociados a materia orgánica), con trazas de circón, turmalina y rutilo; estos últimos definen la presencia de rocas ígneas ácidas desde el área fuente, mientras que la presencia de epidota está asociada a fluidos hidrotermales, Figura 16.

La muestra LCPG-22 tomada de un núcleo de perforación dentro del área de estudio de la mina La Esmeralda está asociada a una roca sedimentaria de la formación Saldaña (Trjs). En general, esta roca presenta un tamaño de grano limo predominantemente, submadura texturalmente, compuesta principalmente por cuarzo monocristalino, feldespato potásico y plagioclasas en una matriz arcillosa, con trazas de turmalina y minerales opacos, donde parte de la matriz se formó a partir de la alteración a arcillas de minerales inestables como el feldespato potásico, que se evidencia por las formas de los granos originales (epimatriz), Figura 17.

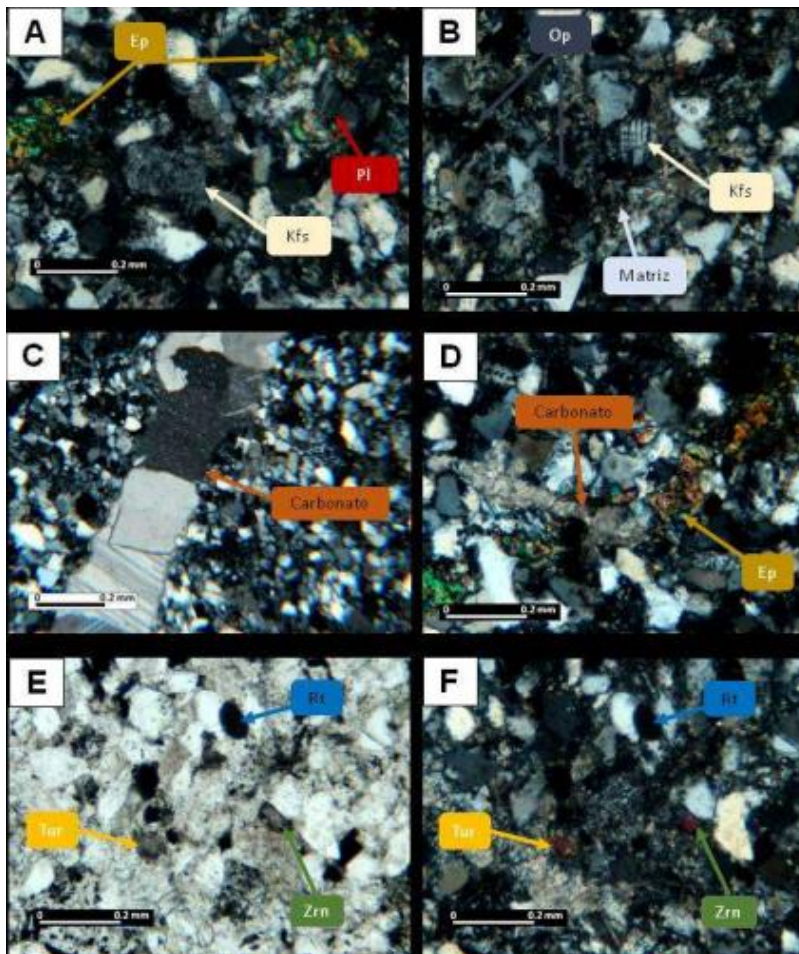


Figura 16. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra LCPG-01. A) Se observa epidota granular (Ep), feldespato potásico (Fk) alteración arcillas y plagioclasa (Pg) con macla polisintética, XPL. B) Opacos (Op) con formas irregulares (materia orgánica) grano de feldespato potásico (Fk) con macla de la microlina, XPL. C) Venilla de carbonato, XPL. D) Venilla de carbonato en paragénesis con epidota (Ep) XLP. E. Minerales accesorios: Turmalina (Tur), Rutilo (Rt) y Zircón (Zrn), PPL. F) Igual que en la fotografía anterior, XPL.

Fuente: Informe Petrográfico Laboratorio Petrográfico Rock ThinS.

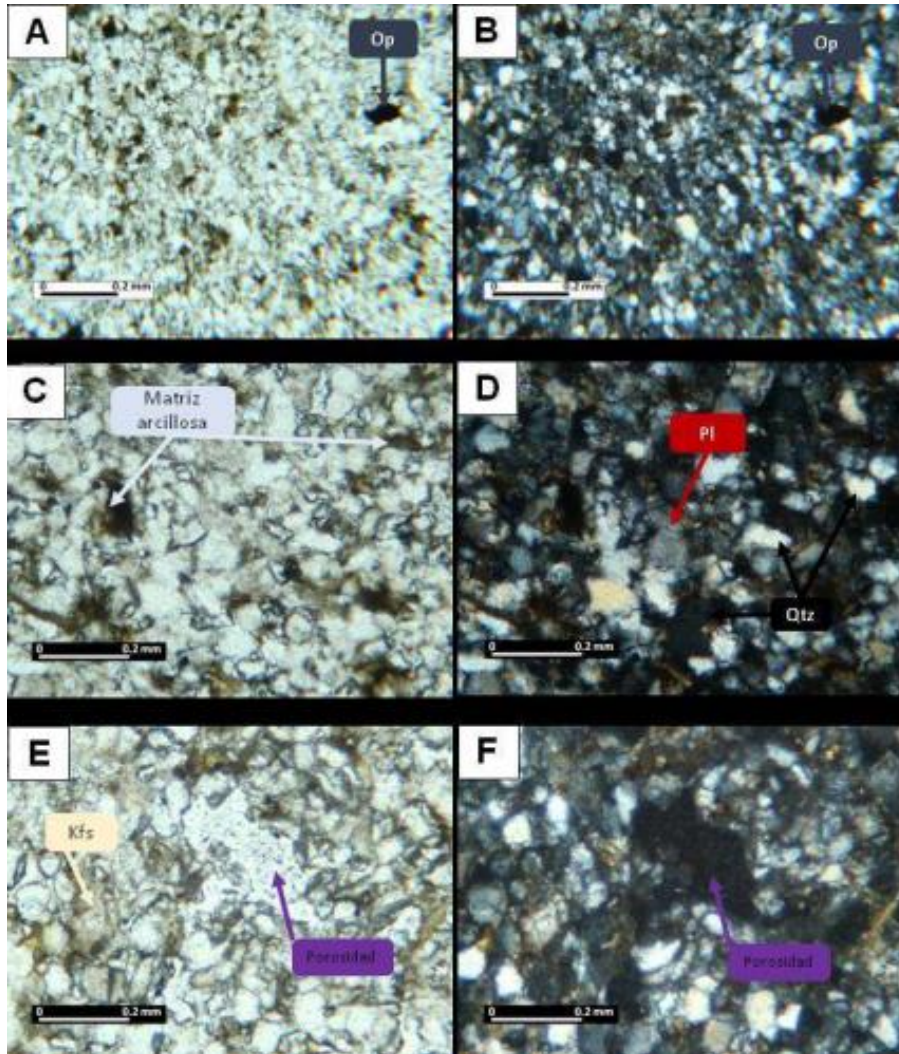
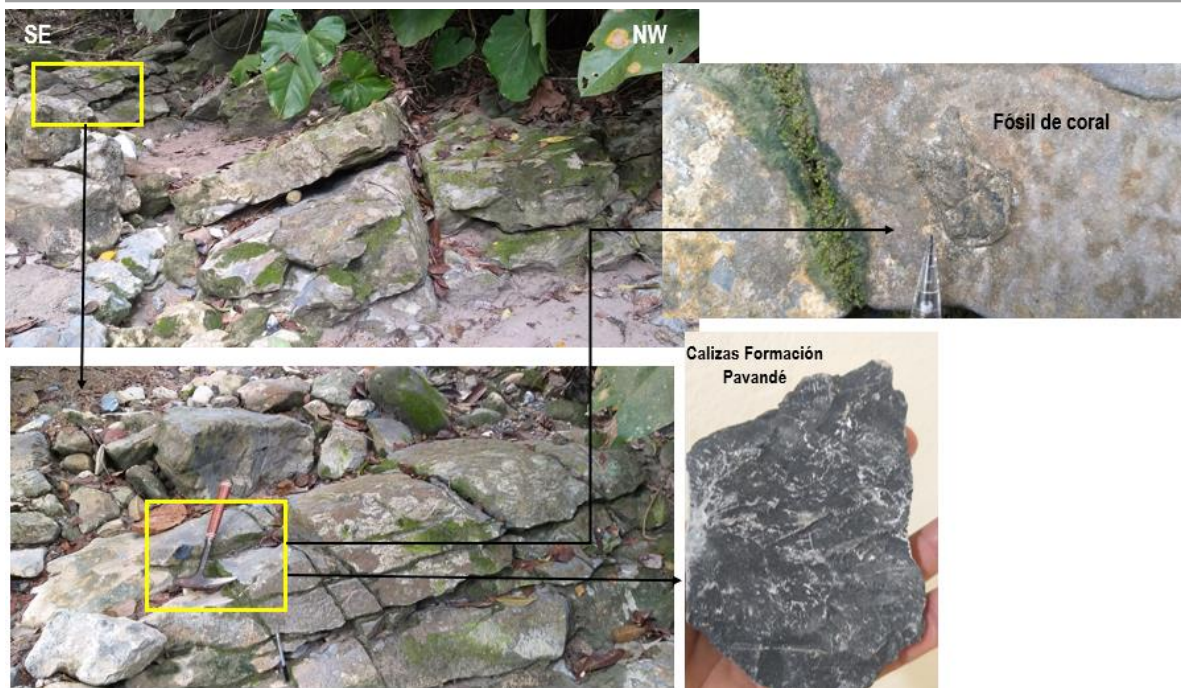


Figura 17. Imágenes de caracterización (5X - 10X) muestra LCPG-21. A) Se observa textura general de la muestra, granos de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa tamaño de grano limo, PPL. B) Misma fotografía anterior, XPL. C) Detalle de granos de cuarzo (Qz), plagioclasa (Pg) y matriz arcillosa, PPL. D) Misma fotografía anterior, XPL. E) Evidencia de porosidad interpartícula y grano tamaño limo de feldespato potásico (Fk), PPL. F) Misma fotografía anterior, XPL.

Fuente: Informe Petrográfico Laboratorio Petrográfico Rock ThinS.

- Formación Payandé (Trsp)

Es la unidad litológica de mayor interés económico para la explotación de calizas por parte de Cemex S.A. Afloza al oeste y norte del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda (ver plano CAP05.1-CMAB-MNLAES-GLMA-001 y Figura 3). Al oeste de este título y sobre los puntos de control 835 (Fotografía 14) y 851 (Fotografía 15), se observaron calizas masivas de tonalidades gris medio a oscuro a gris azuladas, con la ocurrencia de fósiles (bivalvos y corales), duras y con procesos de precipitación de los carbonatos, algunas venillas de calcita cortando la estratificación. Estas rocas se presentan en capas delgadas a medias, duras, secas y con un perfil IIB de rocas moderadamente meteorizadas (Deere & Patton, 1971). Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001; Figura 227.



Fotografía 14. Calizas grisáceas oscuras micríticas, con presencia de fósiles (corales) de la Formación Payandé (Trsp), en el punto de control 835, sector Los Huilos, adyacente al título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 395; Coord. Norte 2 033 844.

Fuente: Elaboración propia.



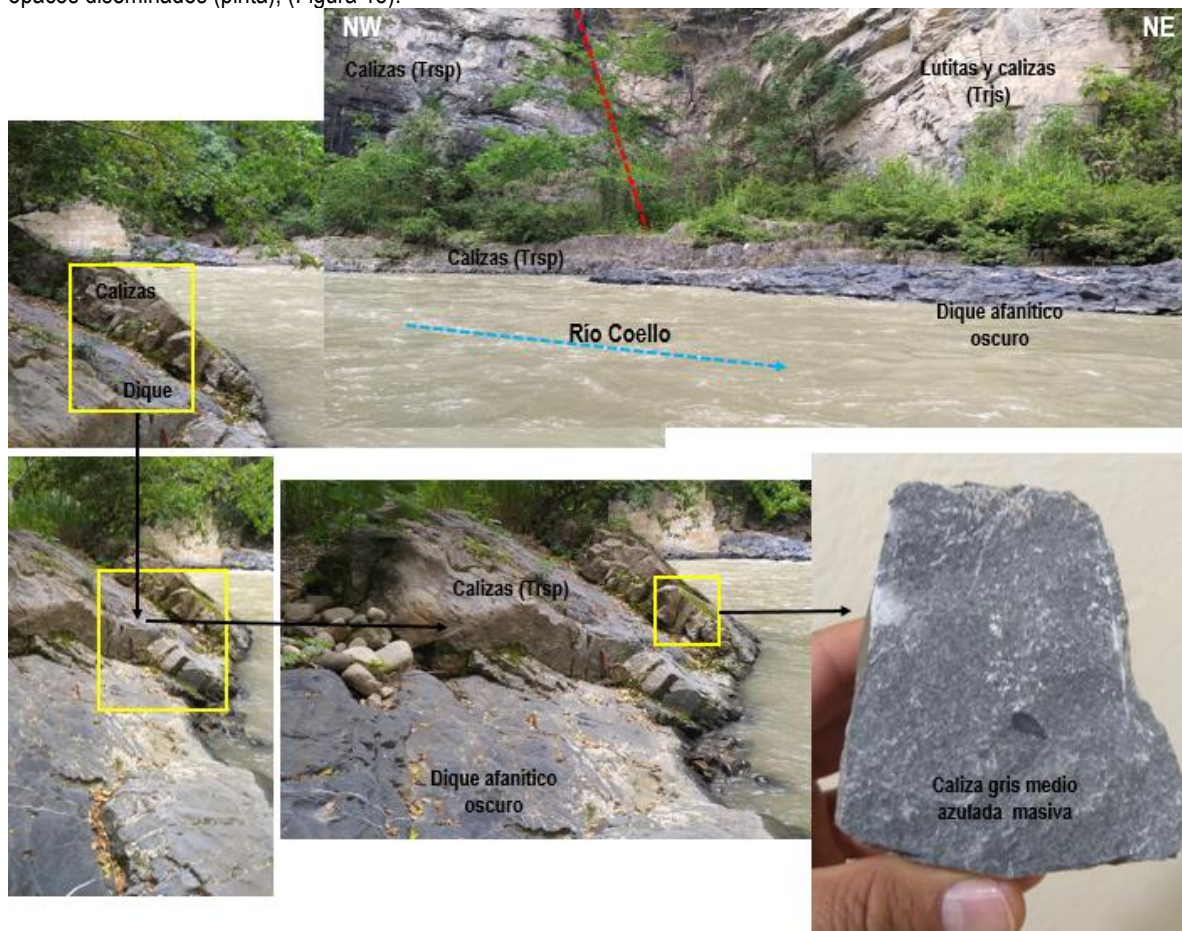
Fotografía 15. Calizas azuladas masivas con microvenillas de calcita de la Formación Payandé (Trsp) sobre un drenaje seco en el sector Los Huilos, adyacente al título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 395; Coord. Norte 2 033 844

Fuente: Elaboración propia.

Hacia el sector norte y noreste del área del título minero 745 se observaron calizas masivas grises oscuras en capas gruesas; en el área del lecho del río Coello y sobre el punto de control 849 se presentan estas rocas en contacto fallado con la formación Saldaña (Trjs) y cortada por diques gruesos de textura afanítica y composición andesítica de tonalidades oscuras (Fotografía 16).

Teniendo en cuenta los análisis petrográficos efectuados en los macizos rocosos que constituyen el basamento en el área del título minero de la mina La Esmeralda, se reconocen las diferentes características texturales y de composición para esta unidad litológica de la formación Payandé (Trsp).

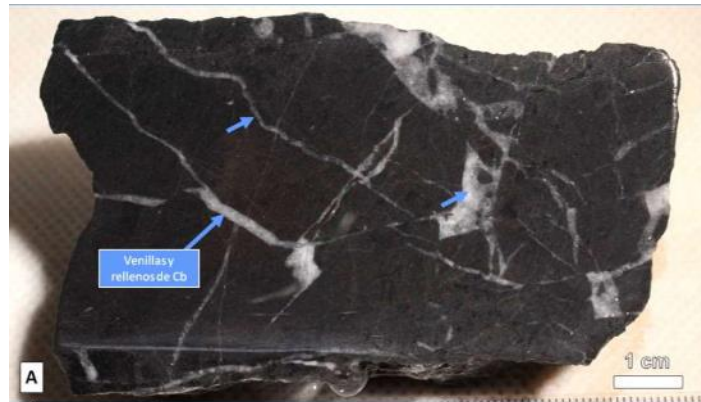
La muestra LCPG-19, representa una caliza gris oscura del pit minero actual de la mina La Esmeralda (Fotografía 17). El análisis petrográfico permitió caracterizarla como una roca caliza, compuesta por micrita (lodo calcáreo), microesparita y +/- pseudosparita, presencia de venillas de carbonato, Cb+/- materia orgánica, con trazas de cuarzo monocristalino y opacos diseminados (pirita), (Figura 18).



Fotografía 16. Calizas grises azuladas masivas de la Formación Payandé (Trsp) cortadas por diques oscuros grisáceos afaníticos composición andesítica sobre ambas márgenes del río Coello, al fondo contacto fallado con la formación Saldaña (Trjs), punto de control 849, al NE del área del título 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 034; Coord.

Norte 2 033 892

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 17. Roca de composición calcárea, con venillas de calcita y pirita diseminada pit minero actual, mina La Esmeralda.

Fuente: Informe Petrográfico Laboratorio Petrográfico Rock ThinS.

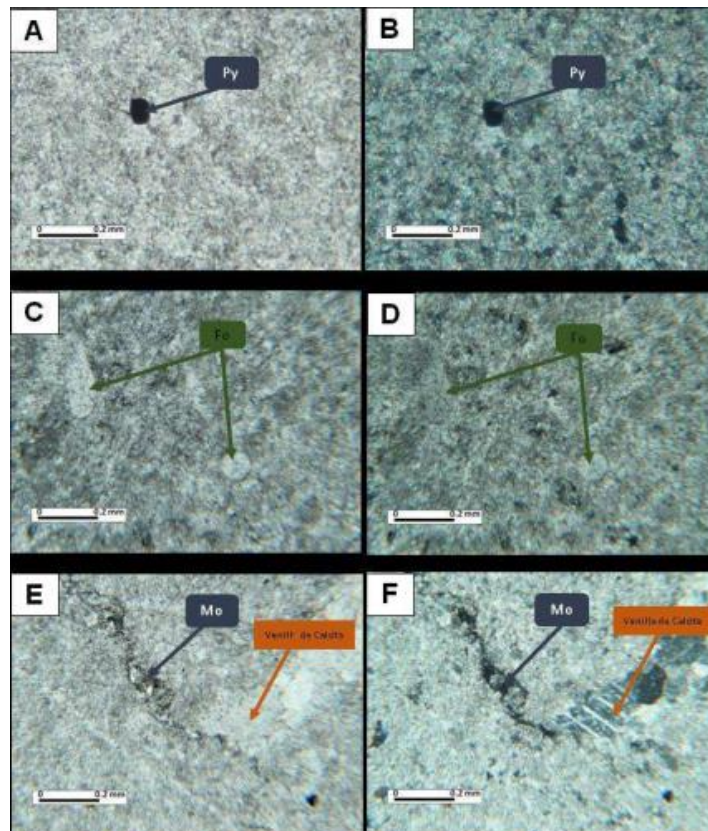


Figura 18. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra LCPG-19. A) Se observa vista general de la muestra: micrita entremezclada con microesparita y cristal de pirita (Py), PPL. Misma fotografía anterior, XPL. C) Se observan moldes de fósiles totalmente recrystalizados por pseudoesparita, PPL. D) Misma fotografía anterior, XPL. E) Se observa venilla de calcita y materia orgánica (Mo), PPL. F) Misma fotografía anterior, XPL.

Fuente: Informe Petrográfico Laboratorio Petrográfico Rock ThinS.

El análisis petrográfico de la muestra de roca LCPG-14, refleja caliza compuesta por micrita (lodo calcáreo), materia orgánica, con cemento microesparítico, pseudoesparita, aloquímicos (bioclastos, intraclastos, oolitos); en menor porcentaje granos de cuarzo monocristalino y opacos diseminados (pirita); trazas de moscovita. Se observan estilolitos con morfología

en ondas y “Sharp Peak”, los fósiles no presentan orientación preferente. El ambiente de depositación de estas rocas corresponde a un ambiente marino poco profundo (lagoon somero o plataforma marina somera). La presencia de bioclastos fragmentados y no completos, y la evidencia de intraclastos indican intervalos de alta energía. Formación de estilolitos alrededor de toda la muestra indicando así que la roca fue sometida a esfuerzos tectónicos o sobrecarga litostática. Presenta bioturbación evidenciada por el proceso de micritización en los bordes de algunos bioclastos. Los procesos diagenéticos evidenciados en la muestra son recristalización de carbonatos (pseudoesparita) y silicificación, Figura 19.

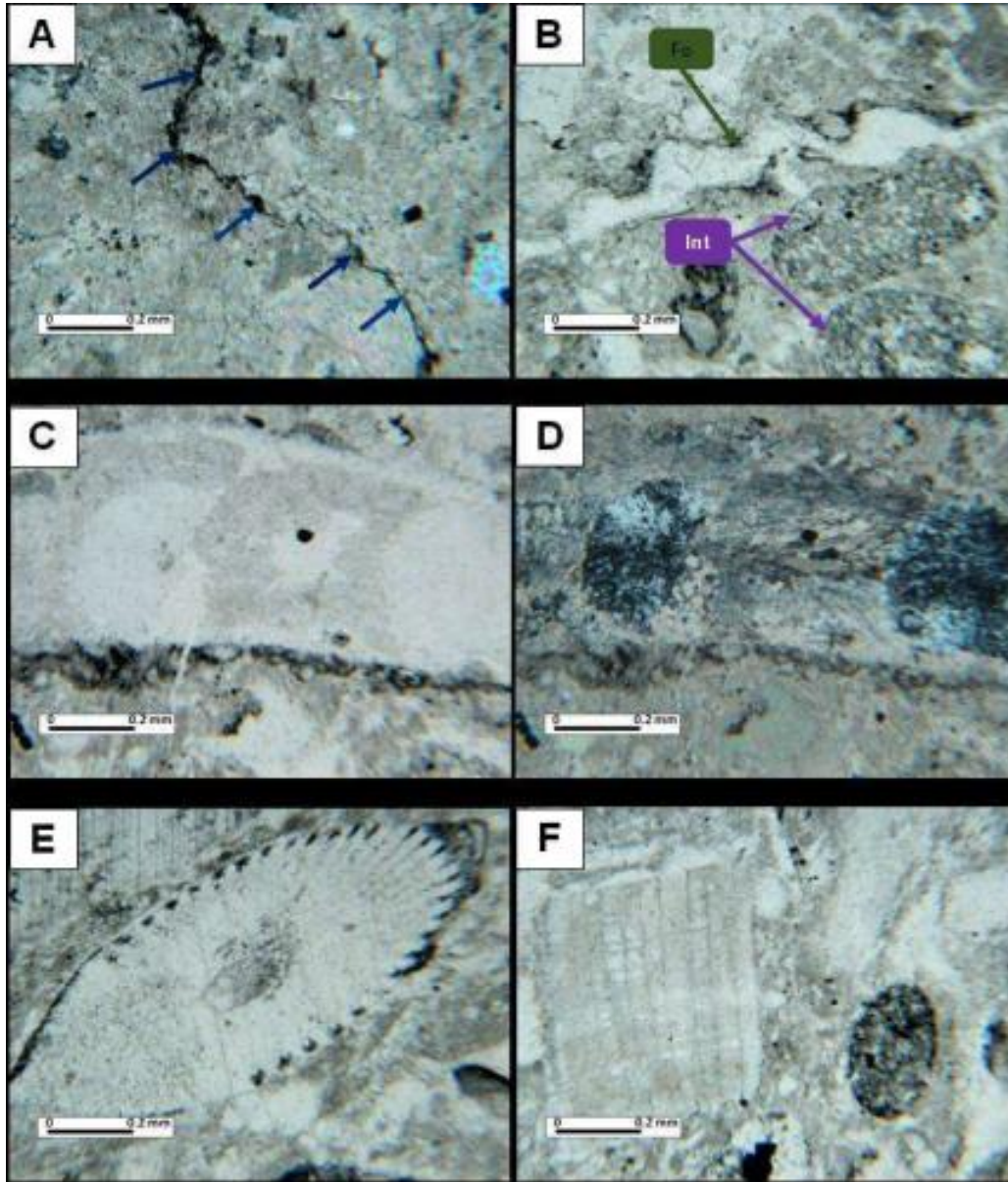


Figura 19. Imágenes de caracterización microscópica (5X - 10X) muestra LCPG-14. A) Se observa estructura irregular de estilolito señalizada con flecha de color azul, en contacto con esparita y pseudoesparita, XPL. B) Fragmento de fósil (Fo) de braquiópodo, PPL. C. Fragmento de fósil (Fo) posiblemente de braquiópodo con textura fibrosa, parcial silicificación por calcedonia y evidencia de micritización, PPL. D) Misma fotografía anterior, XLP. E) Fósil de briozoo con parcial micritización, PPL. F) Fósil tabular e intraclasto, PPL.

Fuente: Informe Petrográfico Laboratorio Petrográfico Rock ThinS

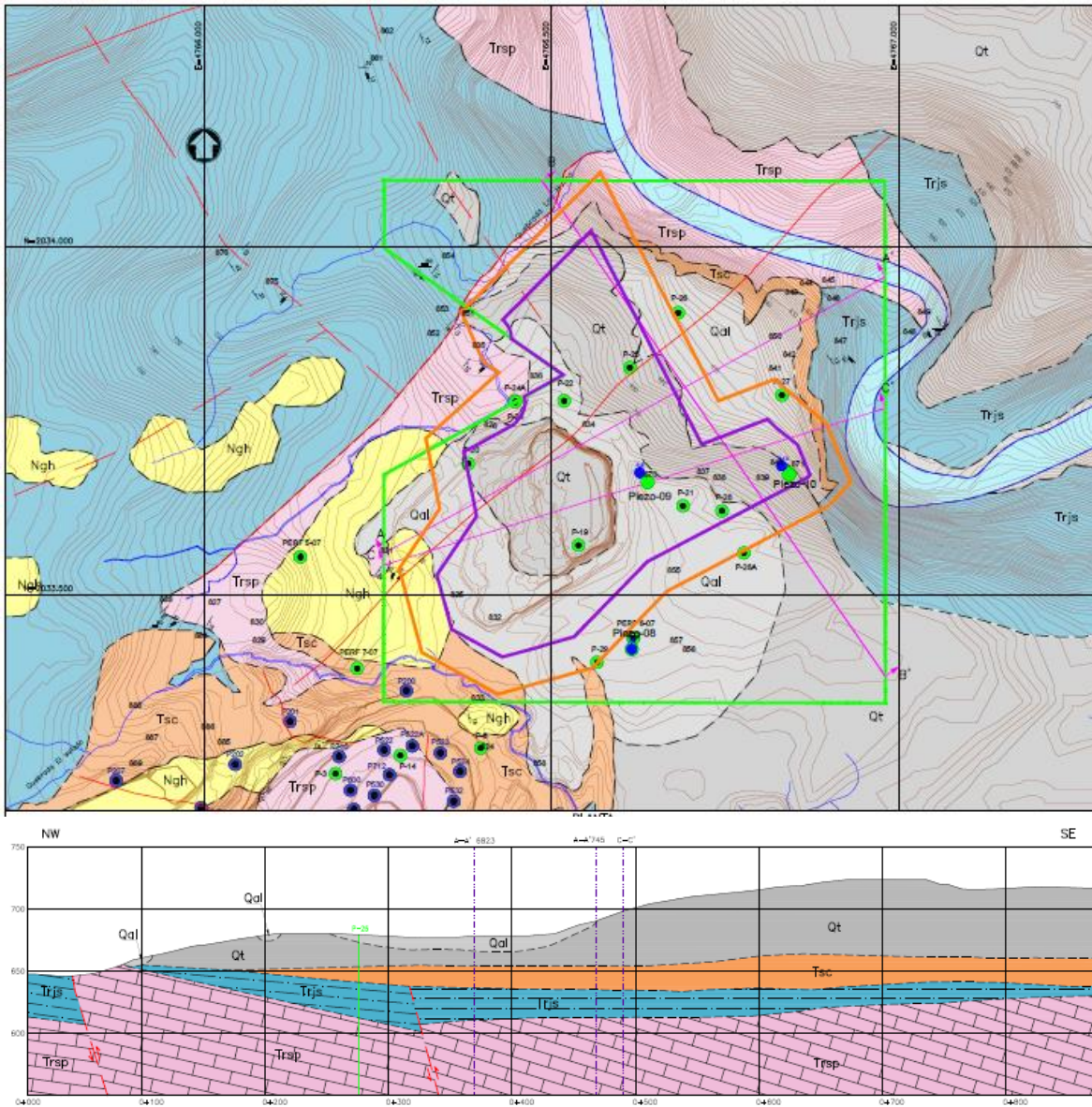


Figura 20. Geología en planta (arriba) y sección de análisis B-B' TM 745 Mina La Esmeralda. Se ilustra la distribución de las exploraciones directas e indirectas en el área de influencia y del yacimiento de las arenas de puzolana
Fuente: Elaboración propia

5.1.1.2.3. Geología estructural.

Con base en la observación de las labores de campo en el marco del estudio de la modificación del título minero 745, obteniendo información directa a lo largo del área de influencia del estudio cubriendo la mayor área del título minero 6823 de la mina La Esmeralda, se presenta en detalle los resultados de las observaciones del levantamiento de puntos de control geológico, que incluye la toma de datos estructurales en afloramientos rocosos y formaciones superficiales que afloran en el AI del componente; además, datos estructurales complementarios a la información de referencia que soportan

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

el modelo geológico de superficie y del subsuelo del proyecto como estratificación, diaclasas y fracturas del macizo rocoso, Tabla 5; así mismo, registrar las evidencias del contacto fallado entre las unidades triásicas de la Formaciones Payandé (Trsp) y Saldaña (Trjs) en la margen izquierda del río Coello, al Noreste del área de influencia y el fallamiento de tipo normal con dirección SE-NW, en rocas de la Formación Saldaña al noroeste del título minero 745, punto de control 876 en Tabla 5, ver Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001.

Tabla 5. Relación de discontinuidades en el área del título minero 745 mina La Esmeralda.

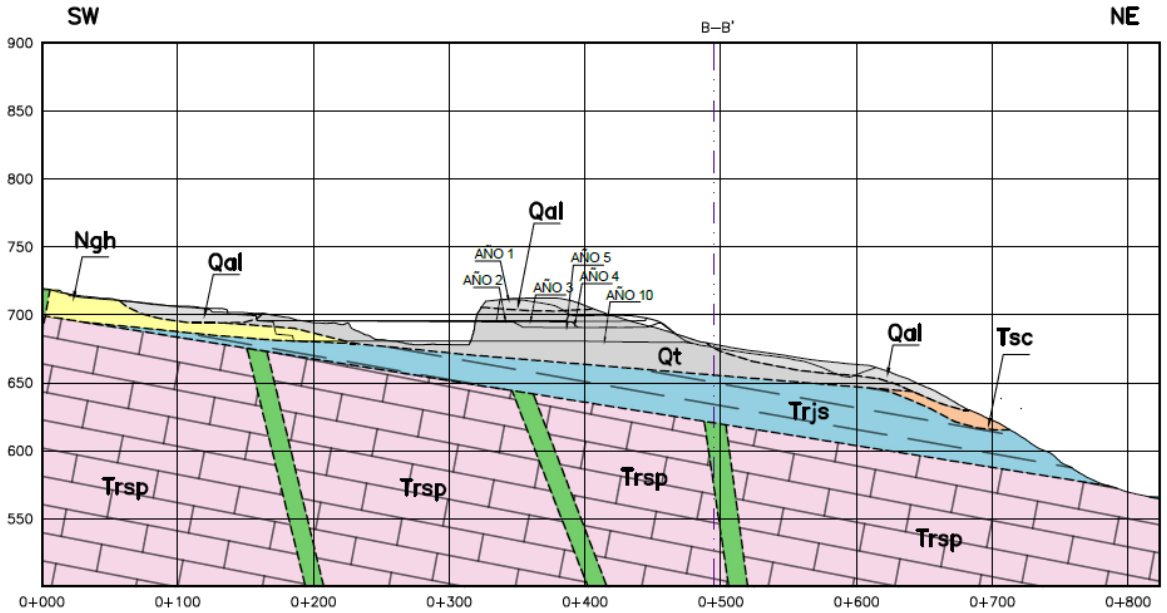
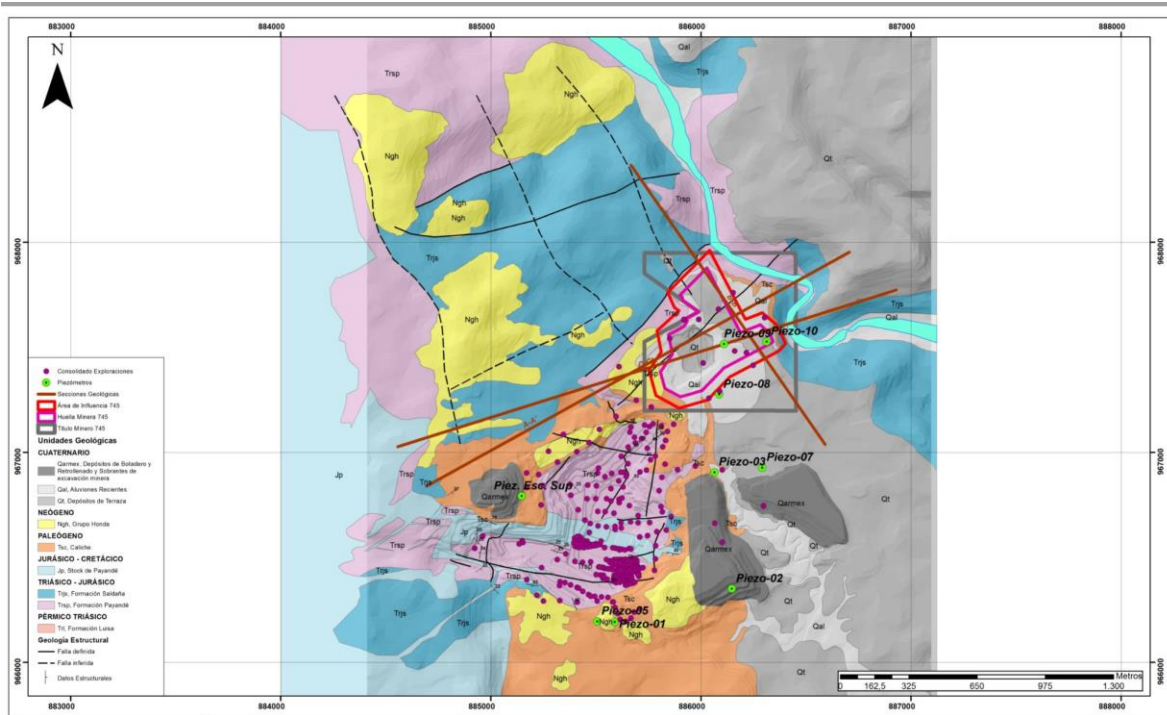
Punto de control	Coordenadas Magna Sirgas Origen Bogotá		Coordenadas Origen Único Nacional		Litología	Estratificación		Diaclasa 1		Diaclasa 2	
	Este	Norte	Este	Norte		Rumbo	Buz.	Rumbo	Buz.	Rumbo	Buz.
831	885732	967402	4766263,6	2033548,9	Trsp	N35°E	25°SE	N22°E	35°NW	N45°E	50°NW
833	885863	967191	4766394,3	2033337,8	Ngh	N10°W	16°NE	---	---	---	---
835	885863	967698	4766395,0	2033844,7	Trsp	N40°E	20°SE	N50°E	5°NW	N5°W	87°SW
847	886384	967706	886386,0	967706,0	Trjs	N35°W	12°NE	N45°W	75°SW	---	---
849	886504	967747	4767034,9	2033892,8	Trsp	N25°W	15°NE	E-W	76°S	N25°W	68°SW
851	885848	967743	4766380,1	2033889,7	Trsp	N50°E	10°SE	---	---	---	---
854	885819	967828	4766351,2	2033974,7	Trjs	N35°E	12°SE	E-W	89°N	N18°W	86°SW

*Buz.: Buzamiento discontinuidad

Fuente: Elaboración propia.

A nivel estructural, el título minero 745 de la mina La Esmeralda, se caracteriza por la presencia de varias discontinuidades identificadas sobre los puntos de control geológico 831, 833, 835, 847, 849, 851 y 854, Tabla 5; en el plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002 se ilustra la distribución del yacimiento del título minero 745 y secciones geológicas A.A' y B-B', se muestra las relaciones estratigráficas y estructurales a nivel del yacimiento de las calizas de la Formación Payandé y las unidades geológicas que lo limitan, Figura 3 y Figura 20.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO



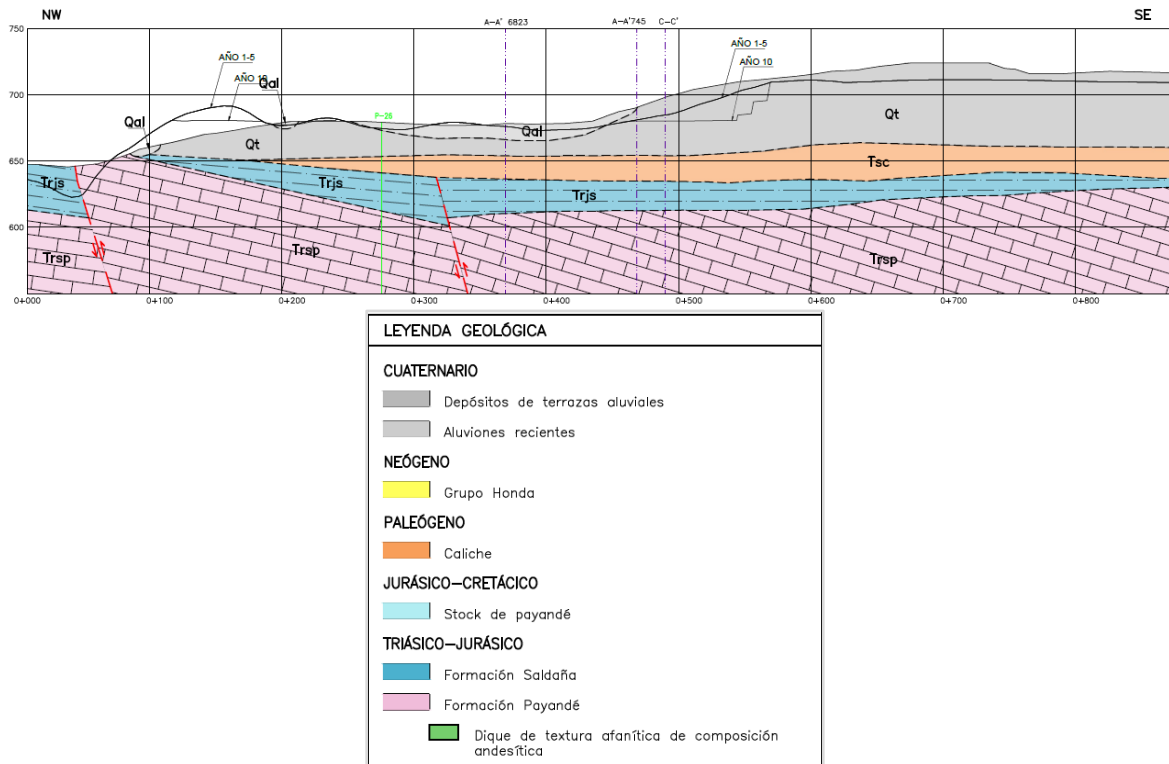
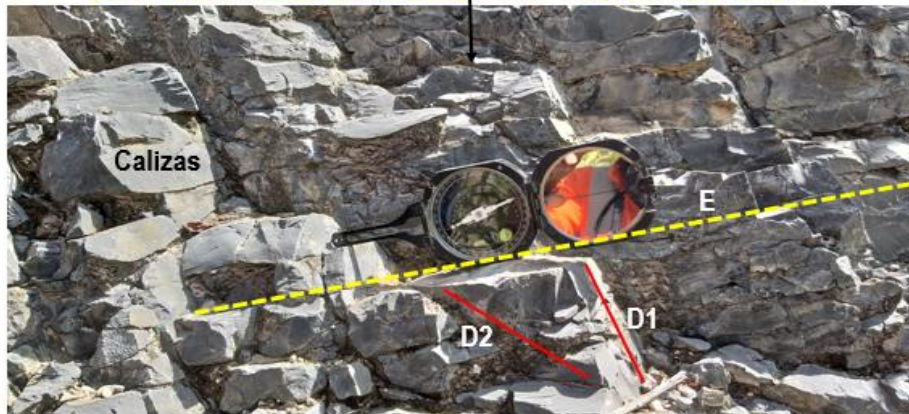


Figura 21. Planta y secciones geológicas A.A' (arriba) y B-B'(abajo) del título minero 745 de la mina la Esmeralda.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la toma de datos estructurales sobre los afloramientos rocosos de la formación Payandé (Trsp) al suroeste y noroeste del área del título minero 745, muestran una tendencia de los estratos con rumbo preferente al NW variando su ángulo entre 35° y 50° y buzamientos que varían entre los 10° y 25° (ver Fotografía 18 y Fotografía 19). Estas rocas de la formación Payandé (Trsp) en esta zona del título minero, presentan dos familias de diaclasas que cortan casi de manera ortogonal a la estratificación, sobresalen diaclasas D1 con tendencia de rumbo N22±50°E y buzamientos entre 5° y 50° al NW, mientras que otra familia de diaclasa D2 muestra un rumbo N 5° W y buzamiento de 87° SW (Tabla 5).



Fotografía 18. Calizas masivas grises azuladas de la formación Payandé del punto de control 831. Se observa la estratificación con rumbo preferente al NE, buzando al SE y dos familias de diaclasas D1 y D2 que cortan casi ortogonalmente a estos estratos. Coord. Este 4 766 263; Coord. Norte 2 033 548
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 19. Calizas masivas grises azuladas de la formación Payandé del punto de control 851. Se observa la estratificación con rumbo preferente al NE y buzamiento al SE, sector los Huilos, título minero 745. Coord. Este 4 766 380; Coord. Norte 2 033 889
Fuente: Elaboración propia.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Al igual que las rocas de la formación Saldaña (Trjs), en esta área de estudio al noroeste, sus estratos presentan rumbo preferente N35°E y buzamiento de 12°SE, observados en el punto de control 854; con dos familias de diaclasas una ortogonal rumbo E-W y buzamiento de 89°N y la diaclasa dos con rumbo N18°W y buzamiento 86°SW, (Fotografía 20).



Fotografía 20. Calizas arenosas de grano fino grisáceas con esporádicas venillas de carbonatos, líticas oscuras, cortadas por diques afaníticos de composición andesítica, de la Formación Saldaña (Trjs),; se muestra la estratificación con buzamiento al SE y dos familias de diaclasas, una ortogonal a la estratificación, punto de control 854. Coord. Este 4 766 351; Coord. Norte 2 033 974
Fuente: Elaboración propia.

Mientras que las rocas de edad neógeno de la formación Honda (Ngh) al suroeste del área del título minero 745 muestran una tendencia de sus estratos con rumbo preferente de N10°W y buzamiento de 16°NE (Fotografía 21).



Fotografía 21. Areniscas de grano medio a conglomerático y capas delgadas de conglomerados en el punto de control 833 al sur del polígono 745, mostrando la estratificación de sus capas con rumbo al NW y buzando al NE. Coord. Este 4 766 394; Coord. Norte 2 033 337
Fuente: Elaboración propia.

Al noreste del área del título minero 745 en la cuenca del río Coello se observó que las rocas triásicas de las formaciones Payandé (Trsp) como Saldaña (Trjs), muestran que sus estratos siguen la tendencia regional con rumbos al NW entre 25° y 35° y buzamientos que varían entre los 12° y 15° al NE; sin embargo, sobre la margen derecha del río Coello, estas

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

rocas poseen rumbos y buzamientos opuestos, en particular, se observó contacto fallado entre estas dos unidades, los estratos de la formación Payandé poseen un rumbo NW y buzamiento al NE y las rocas de la formación Saldaña muestran rumbo al NE y buzamiento al NW, como se puede ver en la Fotografía 22.



Fotografía 22. Contacto fallado entre las formaciones Payandé (Trsp), izquierda con rumbo de sus estratos al NW y buzamientos al NE, derecha se observan rocas lutíticas y calcáreas de la formación Saldaña (Trjs) con rumbo NE y buzando al NW, cortadas por diques afaníticos oscuros, punto de control 849, al NE del área del título 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 034; Coord. Norte 2 033 892

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2.4. Geoquímica del yacimiento de arenas puzolánicas TM 745

De acuerdo con la caracterización del yacimiento objeto de explotación⁶, a continuación se presentan los resultados de las dos últimas labores de exploración y ensayos físico-químicos realizados en las Arenas Puzolánicas del área de Payandé asociados al título minero 745, por medio de las cuales se ha determinado su aptitud para uso como aditivo en la fabricación de cemento Pórtland.

En 1998 la empresa CEMEX Colombia, evaluó dos niveles inferiores del yacimiento para determinar su comportamiento como aditivo del cemento, las arenas utilizadas fueron la M1 que corresponde al nivel superior pumítico y la M2 al nivel inmediatamente inferior, las muestras M3 y M4 corresponden a los niveles andesíticos y arenosos no explotados, cada una representa un compósito de 10 m iniciando en la cota 700 hasta la 660 m.s.n.m.

Los cementos molidos en laboratorio con el material cumplen con los requisitos físicos y químicos de las normas Icontec NTC 121 y NTC 321 para cemento Pórtland tipo I y con las especificaciones de empresa. Las arenas presentan reactividad potencial a los álcalis, lo cual debe tenerse en cuenta para efectos de durabilidad.

⁶ CEMEX, 2008. Programa de Trabajos y Obras - PTO Contrato de Concesión TM 745, 2008.

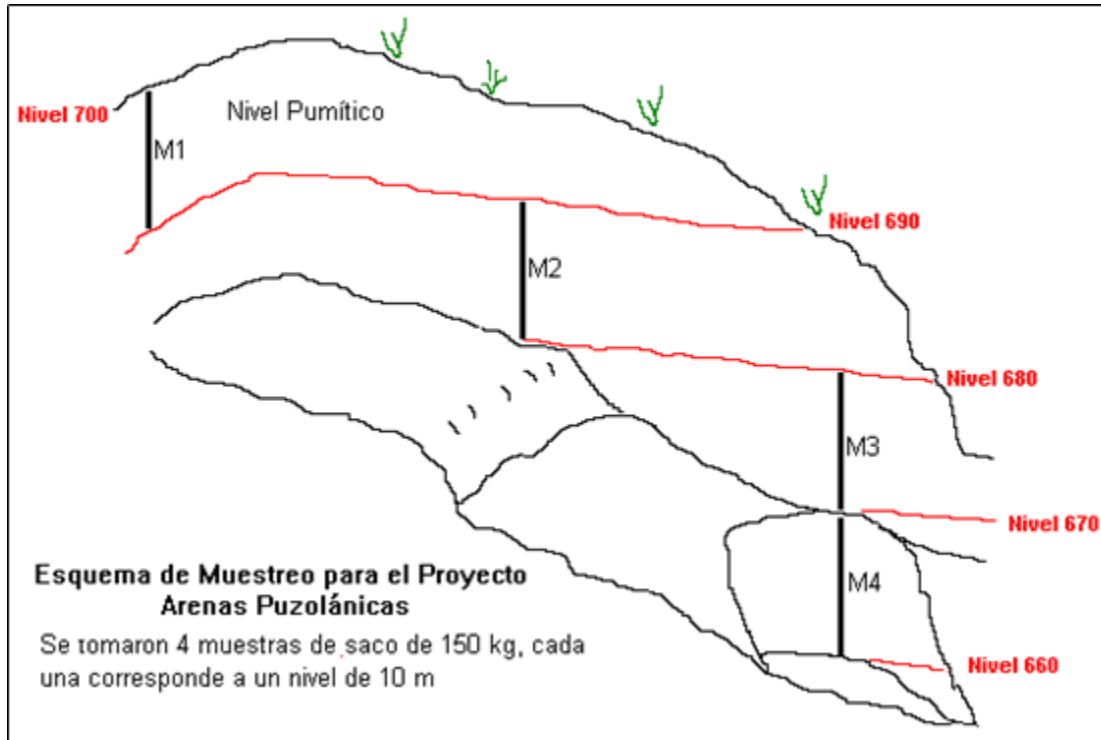


Figura 22. Muestreo para el Proyecto de Arenas Puzolánicas TM 745.

Fuente: CEMEX, 2019

5.1.2. Geomorfología.

Con base en el documento de Carvajal (2011) “PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA EN COLOMBIA”, el Área de Influencia Proyecto se caracteriza desde geomorfo estructura hasta unidad geomorfológica. Considerando que el concepto denominado como geomorfo estructura corresponde a grandes áreas geográficas o amplios espacios continentales o intra continentales caracterizados y definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales que han tenido deformación o basculamiento y posiblemente metamorfismo o intrusión ígnea (Mega Geoformas de origen tectónico). Se consideran como geo morfoestructuras: Los escudos, los bloques de origen continental (Plateaus Orogénicos y Epirogénicos), grandes cuencas de sedimentación, cuencas intracratónicas y Rift Valleys, plataformas y cinturones orogénicos (INGEOMINAS, 2011). En el caso del área de influencia, se le asignan las geomorfoestructuras de la Cordillera Central y depresión del Magdalena Medio.

El siguiente concepto en la jerarquización geomorfológica es el de provincia, que es definido como un conjunto de regiones con geoformas parecidas y definidas por un macro relieve y una génesis geológica similar. Localmente se relacionan con las regiones naturales y con los terrenos geológicos de Colombia, los cuales están delimitados por el trazo de mega fracturas y suturas definidas o inferidas. El nombre propuesto para la Provincia Geomorfológica es compuesto y consiste de un término morfológico de macro relieve, combinado con un nombre geográfico definido por el nombre del terreno geológico o región natural respectiva (INGEOMINAS, 2011), en el caso del área de influencia se enmarca en la provincia de la Cordillera Central.

La región geomorfológica, corresponde a la agrupación de geoformas relacionadas genética y geográficamente. Hace alusión a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se generaron las geoformas. Están definidas por los ambientes morfogenéticos y geológicos afectados por procesos geomórficos parecidos. Comprende los ambientes morfoestructural, volcánico, denudacional, fluvial y lagunar, marino y costero, glacial y periglacial, eólico, kárstico y antropogénico (INGEOMINAS, 2011). el área de de influencia se ubica en la región de serranías estructurales,

y se identifican los ambientes morfogenéticos morfoestructural presentes al occidente y sur del área minera, evidenciado por el flanco oriental de la Cordillera Central, cabalgamientos debidos a fallas y una secuencia de pliegues; ambiente volcánico por algunos flujos piroclásticos y laháricos; ambiente denudacional producto de la erosión en el piedemonte y la presencia de surcos y cárcavas en laderas de materiales poco competentes (ej. Laderas del regolito del Stock de Payandé en el río Coello y quebrada Chicalá); ambiente fluvial en el abanico de Ibagué, el Guamo y las terrazas del río Coello; y ambiente antropogénico concerniente al área de los frentes de explotación y escombreras producto de la actividad minera.

La unidad geomorfológica, se define como una geoforma individual genéticamente homogénea, generada por un proceso geomórfico constructivo o destructivo (acumulación o erosión), típico de un ambiente morfogenético dado. Se identifica inicialmente el ambiente morfogenético seguido de las geoformas específicas (INGEOMINAS, 2011). Entonces para el ambiente morfoestructural en el modelado del contexto geomorfológico regional, se encuentran cuevas, mesetas y pliegues; en el ambiente volcánico se encuentran flujos laháricos interdigitados con abanicos aluviales; en el ambiente denudacional se identifican montañas, lomas y colinas residuales, y superficies de aplanamiento; el ambiente fluvial presenta cauces de ríos, terrazas de erosión, abanicos y planicies aluviales, Tabla 6, Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004.

Tabla 6. Síntesis de provincias y paisajes geomorfológicos para el AI.

Geomorfo Estructura	Provincia Geomorfológica	Región Geomorfológica	Unidad Geomorfológica
Cordillera Central / Depresión del Magdalena Medio	Cordillera Central	Relieve Montañoso (RM)	Estructural- Erosional (EE)
		Relieve Valle (RV)	Fluvial (F) Deposicional

Fuente: elaboración propia

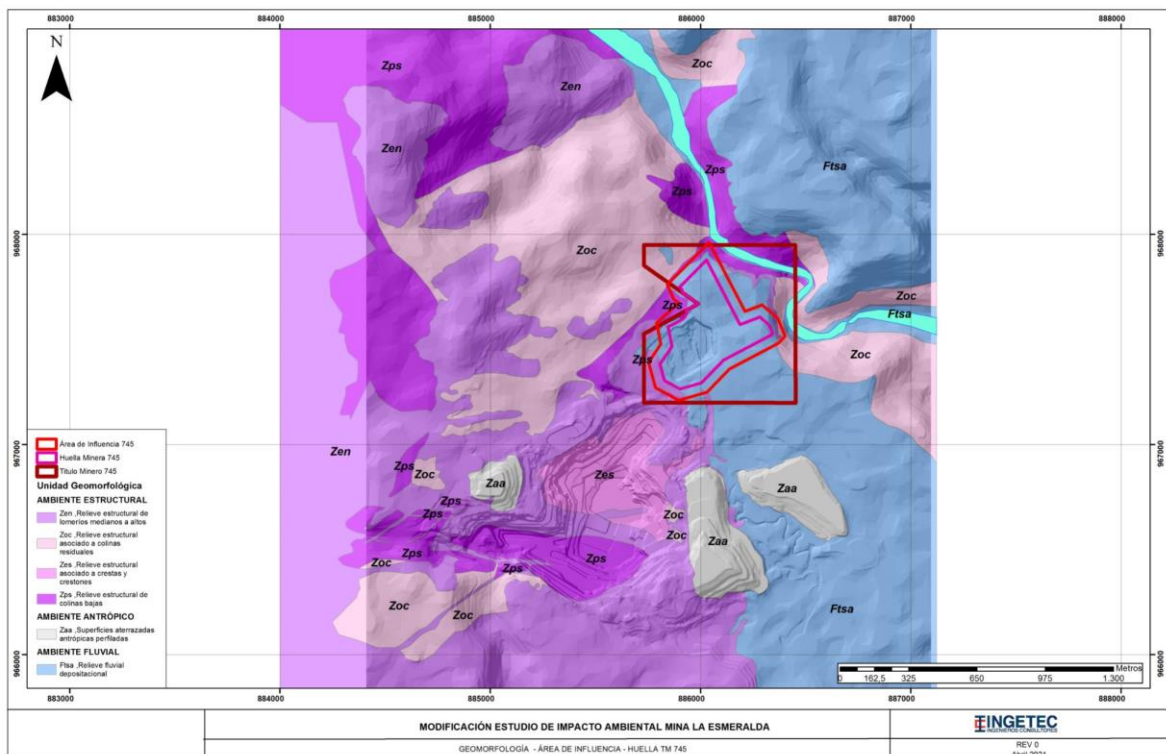


Figura 23. Unidades geomorfológicas asociadas al TM 745.

Fuente: Elaboración propia

El área de influencia para el TM 745, se caracteriza por presentar un tipo de relieve se clasifica como montañoso, con alturas mayores a 500 msnm, contraste de relieve alto (hasta 210 m de diferencia), laderas cóncavas, valles de hasta 30 m en forma de V. El patrón de drenaje es dendrítico a subdendrítico, con una densidad de drenaje alta (~4000m/Km2) e índice de frecuencia medio (~15 drenajes por Km2).

5.1.2.1. Unidades morfogénicas.

El área de influencia del título minero 745, se ubica en la región donde se presentan serranías estructurales, asociados a un ambiente morfogénico de tipo morfoestructural presentes al occidente y sur del área minera, evidenciado por el flanco oriental de la Cordillera Central, cabalgamientos debidos a fallas y una secuencia de pliegues; el otro ambiente modelador del relieve, se encuentra el volcánico con coberturas cuaternarias representadas por flujos piroclásticos y lahares; el ambiente denudacional producto de la erosión en el piedemonte y la presencia de procesos erosivos como surcos y cárcavas en laderas con valles encañonados y controlados por las estructuras geológicas principales; el ambiente fluvial representado por el abanico de Ibagué, el Guamo y las terrazas del río Coello. Gran parte del área del título minero, se presenta distribuido en ambiente de origen fluvial depositacional Volcánico, está relacionado con las coberturas cuaternarias de los depósitos fluvio volcánicos y de morfología de terraza antigua, con espesores que superan los 40 m, los cuales cubren de manera discordante las demás morfologías en rocas terciarias y triásicas, dándole una expresión, de terreno suave a ligeramente ondulado, asociados a la cuenca del río Coello. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.

Las rocas de la formación Payandé, conforman prominencias topográficas de textura moderada que contrastan con las geoformas de origen fluvio deposicional, cuya exposición es favorecida por el grado de disección del río Coello; lomeríos medios a bajos se observan al oeste, sur, suroeste y noreste del título minero 745, que involucran rocas blandas de las formaciones Payandé, con litologías de limolitas, arcillolitas y las rocas paleo-neógenas de la formación Honda y Caliche, que incluyen areniscas deleznable, arcillolitas y carbonatos que envuelven fragmentos de rocas de variada composición. Al noroeste del área del título minero se presentan colinas bajas en rocas de la formación Payandé en contacto con morfologías de colinas bajas representadas por rocas de la formación Saldaña, así como en el este del título disectadas por la cuenca del río Coello, Figura 23.

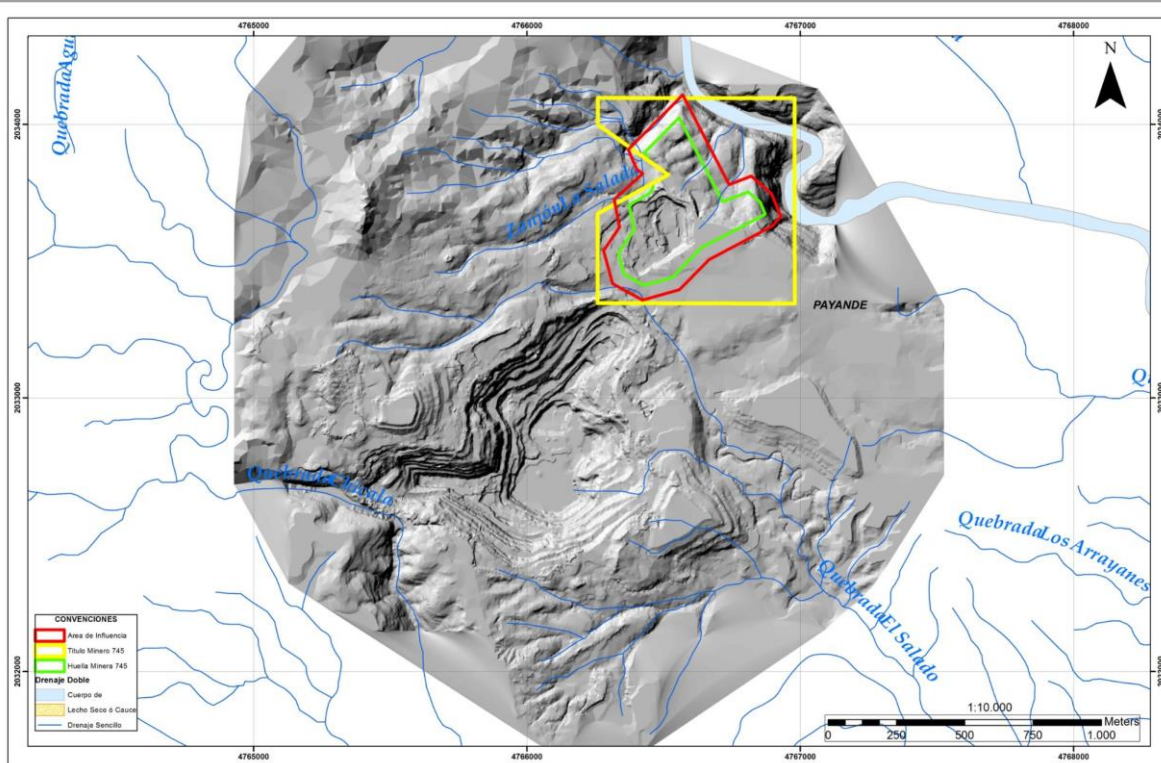


Figura 24. Modelo de Elevación que expone la configuración de la geomorfología del área de influencia del título minero 745 mina La Esmeralda
Fuente: Elaboración propia

Para la elaboración del mapa geomorfológico se parte de la delimitación de las unidades con base en el criterio de uniformidad relativa como: origen general de relieve, tipos de relieve (planicies, lomeríos, piedemontes y laderas de montaña), las estructuras y geometría del relieve. Las características geomorfológicas del Área de Influencia del título minero 745, se definen así:

5.1.2.1.1. Ambiente morfoestructural.

Corresponde a las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la litología y la disposición estructural de las rocas aflorantes en el área de estudio, principalmente de estratos en rocas sedimentarias de la Formación Payandé (Trsp), rocas volcanosedimentarias de la Formación Saldaña (Trjs), rocas ígneas jurásicas del Stock de Payandé (Jp), rocas paleo-neógenas del Grupo Honda (Ngh) y Caliche (Tsc), Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.. Estas unidades se presentan afectadas por las fallas de Cajones, Honduras y Salitre a nivel regional, y dentro del área de influencia del título minero se presentan fallas menores de tipo inverso acompañadas de algunos movimientos normales oblicuos y perpendiculares a la dirección principal (E-W).

Este relieve, incluye geoformas asociadas a crestas y crestones, lomeríos, colinas bajas y colinas residuales, disectados por el río Coello y drenajes menores El Salado, Los Huilos y Chicalá, de morfología casi subparalela, conformando vallecitos abiertos. Los procesos de tipo Estructural son los encargados de generar los paisajes más abruptos y escarpados, pendientes con rangos entre el 50 y >100% asociados a procesos de plegamiento, levantamiento, fracturamiento y fallamiento de las rocas que dan origen a morfologías que destacan en el terreno.

- Zps: geformas del terreno representado por superficies bajas a onduladas distribuidas en casi todas el área directa del título minero 4205 asociado al relieve estructural de colinas bajas y superficies ligeramente planas a moderadamente onduladas, con laderas muy cortas, de pendientes que varían desde ligeramente planas (1 – 3 %) hasta moderadamente inclinadas (7 – 12 %) en suelos y rocas de las Formaciones Payandé (Trsp), Saldaña (Trjs) y Caliche (Tsc); además, por las coberturas cuaternarias aluviales de la dinámica actual del drenaje El Salado y la quebrada Los Huilos al este del título minero principalmente. Al noroeste del área del título minero se presentan colinas bajas en rocas de la formación Payandé en contacto con morfologías de colinas bajas representadas por rocas de la formación Saldaña, así como en el este del título disectadas por la cuenca del río Coello. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.
- Zoc: Su expresión morfológica se encuentra asociada al relieve estructural de colinas residuales de baja elevación con laderas muy cortas y pendientes que varían desde hasta moderadamente inclinadas (7 – 12 %) a ligeramente empinadas (25 – 50 %), con un índice de relieve bajo a moderado. Su origen está relacionado a procesos tectónicos y representados por unidades de rocas blandas de las Formaciones Payandé (Trsp) limolitas, arcillolitas y margas, en menor proporción a rocas del depósito de Caliche (Tsc) y de la Formación Saldaña (Trjs) la parte sedimentaria asociada a lutitas calcáreas. Morfologías en relieve de lomeríos altos se presentan al norte del área del título minero 745, representado por rocas de la formación Payandé; conforman prominencias topográficas de textura moderada, disectados por el río Coello; lomeríos medios a bajos se observan al oeste, sur, suroeste y noreste del título minero, presentes en rocas blandas de las formaciones Payandé, limolitas, arcillolitas, y en las rocas terciarias de las formaciones Honda y Caliche que incluyen areniscas deleznales, arcillolitas y carbonatos que envuelven fragmentos de rocas de variada composición. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.

Las subunidades del relieve asociadas al área de influencia del título minero 745 se describen a continuación:

5.1.2.1.1.1. *Relieve colinado*

Sps: geformas del terreno generadas por superficies bajas a onduladas distribuidas al norte y oeste del área del título minero 745, representado por un relieve de colinas bajas y superficies ligeramente planas a moderadamente onduladas, con laderas muy cortas, de pendientes que varían desde ligeramente planas (1 – 3 %) hasta moderadamente inclinadas (7 – 12 %) en suelos y rocas de las Formaciones Payandé (Trsp), Saldaña (Trjs) y Caliche (Tsc), además por las escasas coberturas cuaternarias aluviales de la dinámica actual de los drenajes El Salado y Los Huilos, al noroeste del título minero principalmente, Fotografía 23. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.



Fotografía 23. Colinas bajas y superficies ligeramente inclinadas a onduladas y planas en suelos y rocas de las formaciones Saldaña (Trjs), Payandé (Trsp) y de los depósitos de Caliche (Tsc) que las cubre de manera discordante al noroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 765 662; Coord. Norte 2 032 812

Fuente: Elaboración propia.

Soc: geoformas que se presentan en los límites del título minero 745 al noroeste y noreste sobre la cuenca del río Coello. Su expresión morfológica se encuentra asociada al relieve estructural de colinas residuales de baja elevación con laderas muy cortas y pendientes que varían de moderadamente inclinadas (7 – 12 %) a ligeramente empinadas (25 – 50 %), con un índice de relieve bajo a moderado. Su origen está relacionado a procesos tectónicos y representados por unidades de rocas blandas de las Formaciones Payandé (Trsp) limolitas, arcillolitas y margas, en menor proporción a rocas del depósito de Caliche (Tsc) y de la Formación Saldaña (Trjs) la parte sedimentaria asociada a lutitas calcáreas, Fotografía 24. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.



Fotografía 24. Colinas residuales bajas con laderas cortas de pendientes empinadas en rocas blandas de la formación Saldaña (Trjs) al noroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Punto Control 857. Coord. Este 4 766 679; Coord. Norte 2 033 421

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.1.1.2. Relieve de lomeríos

Sen: geoformas presentes al noreste y suroeste del área del título minero 745, representado por lomeríos que incluye lomas medias a altas, de laderas cortas, con superficies cóncavas convexas a irregulares, pendientes que varían desde ligeramente escarpadas (25 – 50 %) hasta fuertemente escarpadas (75 – 100 %). Geoforma que representa unidades de suelo y roca de los depósitos paleógenos de Caliche (Tsc), constituidas por fragmentos de calizas, limolitas y granodioritas en matriz arcillosa, Fotografía 25. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.



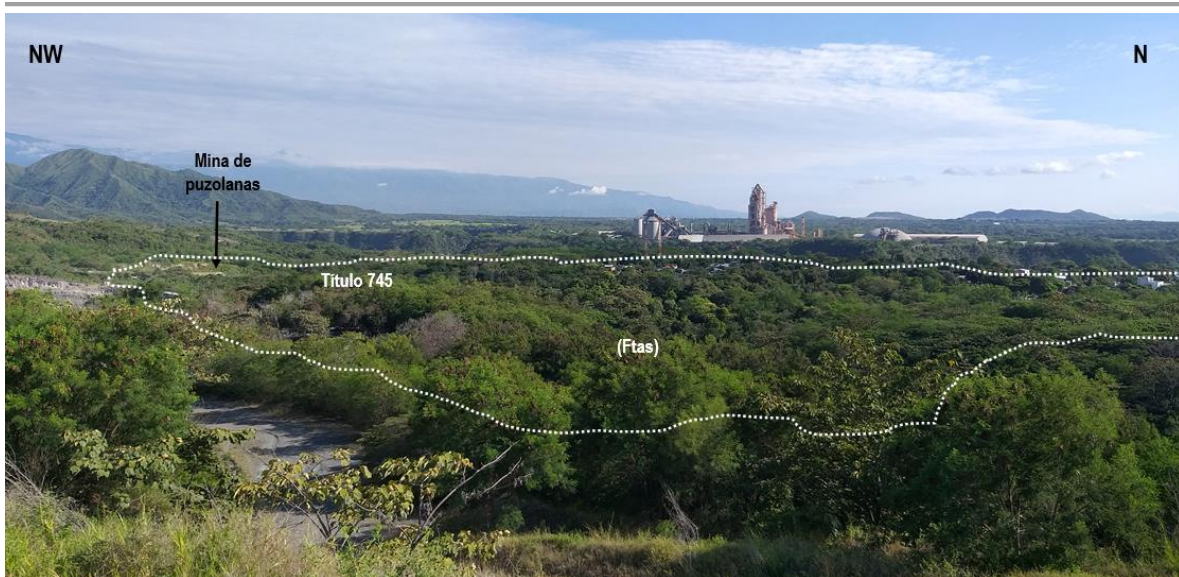
Fotografía 25. Lomas medias a bajas de laderas cortas superficies cóncavas-convexas en depósitos de Caliche (Tsc) cubriendo discordantemente a rocas de la formación Payandé (Trsp) al noroeste del título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 866
Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.1.2. Ambiente fluvial

Corresponde a la unidad con mayor distribución en el área de influencia del título minero 745, de origen fluvial depositacional en el área de estudio del título minero 745, está relacionado con las coberturas cuaternarias de los depósitos aluviales y de morfología de terraza antigua, con espesores que superan los 40 m, los cuales cubren de manera discordante las demás morfologías en rocas terciarias y triásicas, dándole una expresión, de terreno suave a ligeramente ondulado, asociados a la cuenca del río Coello. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.

5.1.2.1.2.1. Relieve Terraza aluvial antigua (Ftas)

Terrazas onduladas de moderada extensión en forma de abanico ampliamente explayado, de laderas moderadamente largas, de formas cóncavas y convexas con pendientes suaves a inclinadas. Su origen está asociado con la existencia de abanicos y planicies aluviales antiguos muy disectados que dieron lugar a la acumulación de los sedimentos arenosos y gravosos que incluyen las arenas puzolánicas de origen volcánico generados por la cuenca del río Coello (Qt), distribuidos en el área central del título minero 745 y que incluye las áreas donde se emplaza el corregimiento de Payandé, (Fotografía 26). Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.



Fotografía 26. Morfologías onduladas a ligeramente planas representadas por la terraza aluvial antigua (Qt) del río Coello, parte central del título minero 745 de la mina La Esmeralda.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.1.2.2. Escarpes de terrazas erosivos (Fte)

Morfologías correspondientes a las áreas que incluyen los taludes de corte del proceso extractivo de la mina de puzolanas, con pendientes escarpadas, donde afloran los sedimentos arenosos y gravosos de morfología de terraza (Qt), (Fotografía 28), predominan las arenas de grano medio a grueso con fragmentos y lentes de gravas de rocas de variada composición (volcánicas, extrusivas, sedimentarias), con tamaños gránulos hasta guijos, de formas subredondeadas a redondeadas y con espesor de 10 cm; se presentan sueltos y con buen drenado, dadas las características estables de sus taludes que alcanzan los 28 m de altura, como se puede ver en la Fotografía 27. Su origen está relacionado a procesos de erosión fluvial lateral y evolución del valle del río Coello antiguamente bordeando rocas y abanicos del piedemonte oriental de la cordillera central. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.005.



Fotografía 27. Geformas asociadas a superficies de escarpes erosivos presentes en los depósitos de arenas puzolánicas (Qt) del área título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 765 749; Coord. Norte 2 032 463.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2. Morfografía.

El Área de Influencia Proyecto (AI) del título minero 745 de la mina de puzolanas La Esmeralda, incluye relieves de tipo fluvio depositacional en su gran mayoría (88%) y en menor proporción relieve de origen morfoestructural (12%), los cuales están determinados por la acción tectónica y por los agentes exógenos móviles. El relieve de origen estructural dominante en toda el área de estudio asociado a crestas y crestones, lomeríos, colinas residuales, colinas bajas y superficies planas a ligeramente onduladas, abarca sectores con laderas de pendientes que van desde moderadamente inclinadas (7 – 12 %) a totalmente escarpadas (> 100 %) pronunciados en litologías variadas sedimentarias, ígneas y volcanosedimentarias de las Formaciones Payandé (Trsp), rocas de la Formación Honda (Ngh) y de Caliche (Tsc) principalmente. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-002, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.007.

Topográficamente variable con respecto al relieve antrópico con pendientes moderadamente inclinadas a ligeramente escarpadas (12 – 50 %) asociados a las superficies aterrazadas perfiladas al este y oeste del TM 4205 y morfologías de colinas altas, que involucran los depósitos de terrazas fluvio volcánicas y aluviales recientes que ocupan el 61% del área de influencia (pendientes entre el 0 y 25%).

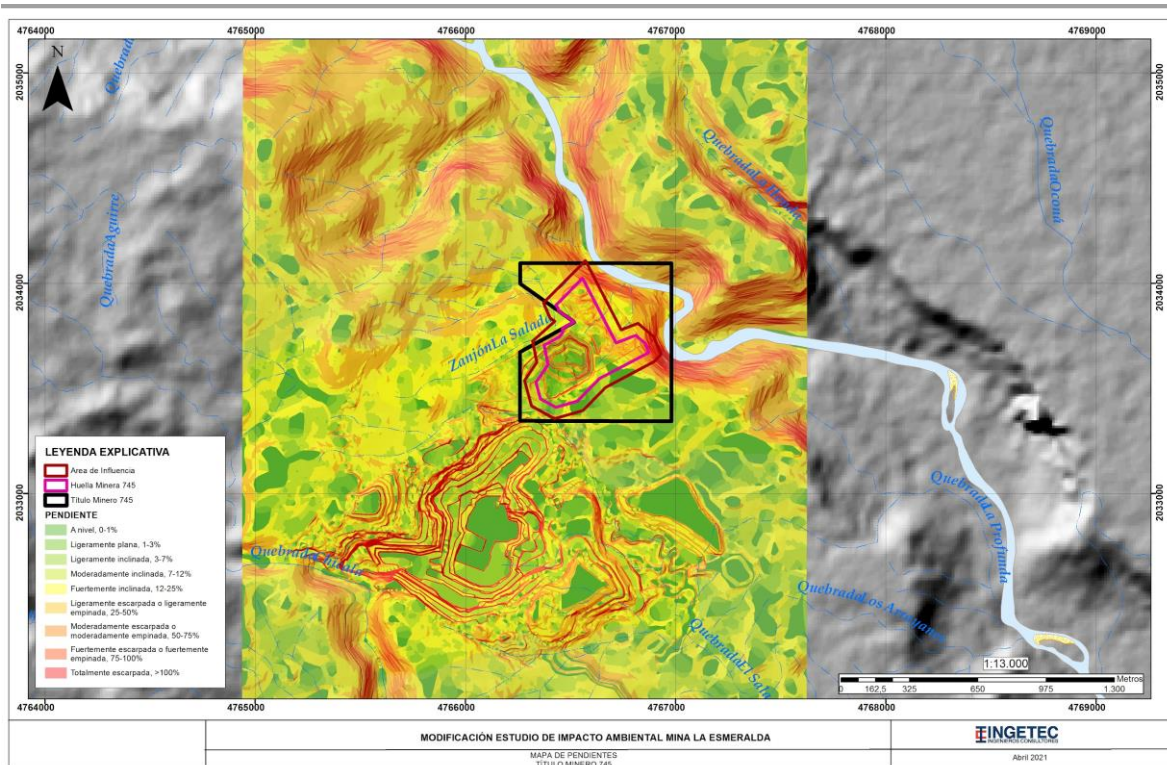


Figura 25. Mapa de pendientes del terreno obtenido de la base topográfica detalle a octubre de 2019; se ilustra la distribución del TM 745 que hace parte de la Mina La Esmeralda.

Fuente: Elaboración propia

La textura y morfología del relieve asociado al área de influencia del título minero 745, se enmarca en pendientes que oscilan entre el 7 al 12% e involucra los sedimentos de las terrazas fluvi volcánicas (Qal-Qt) limitado por colinas residuales de las rocas más antiguas, que para este caso en particular corresponde a la Formación Saldaña y Payandé, que corresponden a las morfometrías entre el 12 y 25%.

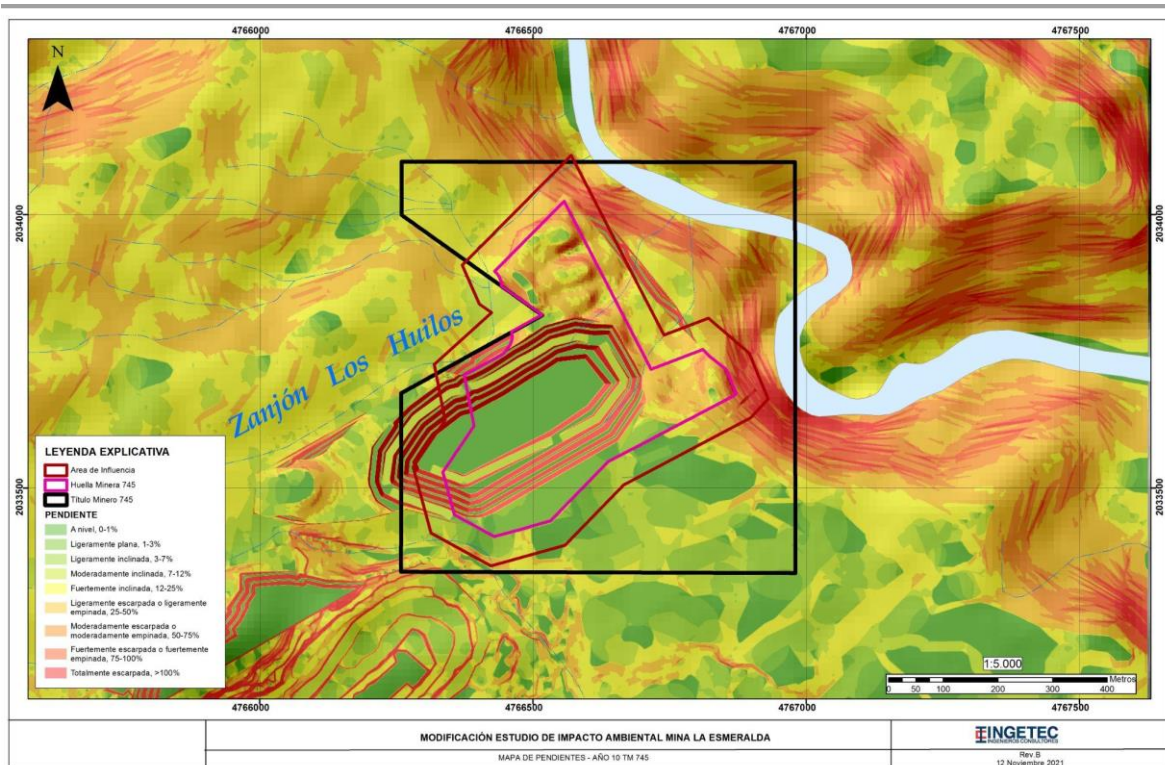


Figura 228. Mapa de pendientes del terreno obtenido de la secuencia minera compatibilizada para el año final (año 10) de las arenas de puzolanas; se ilustra la distribución del TM 745, área de influencia y la huella de intervención en fucsia, Mina La Esmeralda.

Fuente: Elaboración propia

5.1.2.3. Análisis Patrón de Drenaje.

De acuerdo a las condiciones topográficas y litológicas imperantes en toda el área que conforma los títulos mineros de la mina de calizas La Esmeralda, la red de drenajes en estas zonas de la Cordillera Central es densa y ramificada, pero la forma que presentan en conjunto está controlada por las condiciones geológicas y dinámicas de la zona del proyecto. El patrón de drenaje es dendrítico a subdendrítico, con una densidad de drenaje alta (~4000 m/Km²) e índice de frecuencia medio (~15 drenajes por Km²).

En el área de estudio el drenaje dendrítico y subdendrítico, se encuentra asociado a las extensas áreas de rocas sedimentarias de dureza alta de las Formaciones, Payandé (Trsp), Saldaña (Trjs) y a rocas de origen ígneo del Stock de Payandé (Jp), fundamentalmente a calizas, areniscas conglomeráticas, conglomerados, tobas, aglomerados y pórfidos de composición cuarzo diorítica y granodiorítica donde su naturaleza homogénea y afectación estructural (fallamientos y fracturas), brindan un patrón dendrítico de alta densidad donde la forma de los cauces menores está controlada por la pendiente del terreno, Figura 24 y Figura 25.

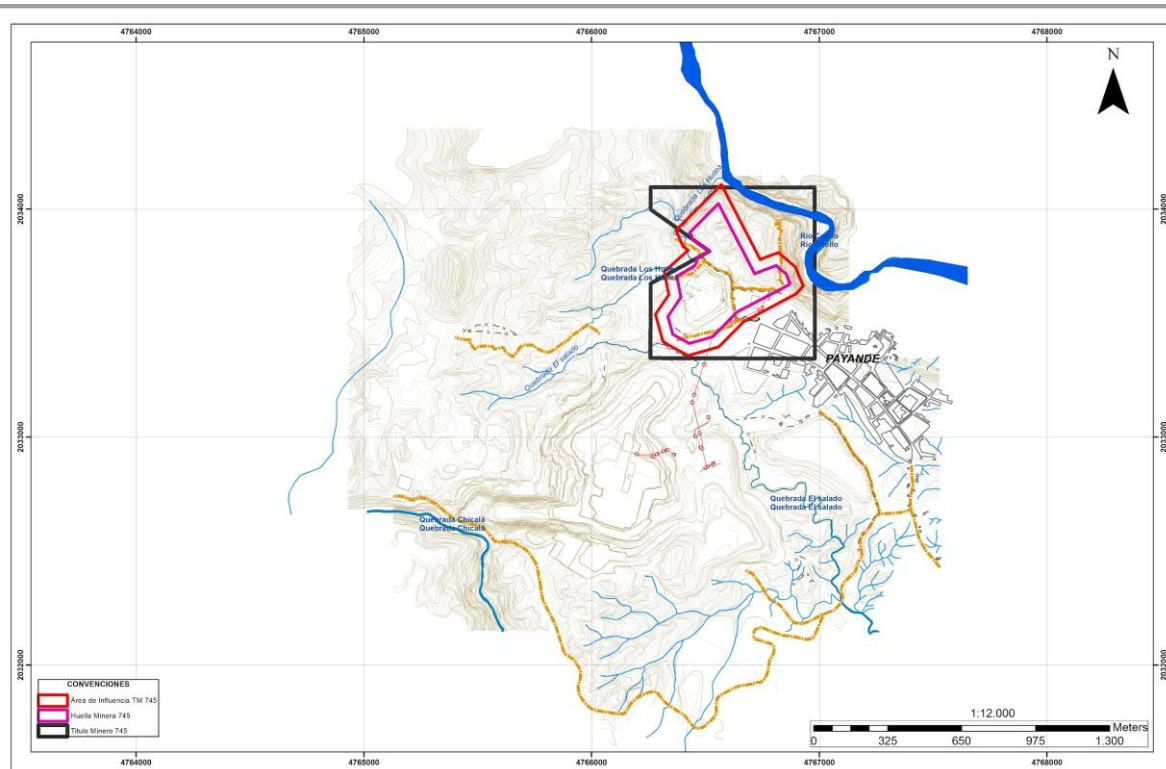


Figura 26. Patrón drenaje en el área de influencia del título minero 745 de la Mina La Esmeralda.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.4. Morfodinámica.

El análisis se realiza con base en la fotointerpretación tiempo espacial de los procesos morfodinámicos asociados al área de influencia y proximidades y se complementa con las observaciones efectuadas por INGETEC en su visita de campo realizada en el mes de septiembre de 2020 al área del título minero 745 de la mina La Esmeralda y del cauce actual del río Coello, teniendo en cuenta principalmente la presencia y desarrollo de procesos erosivos y de remoción en masa, como se puede ver en el plano geomorfológico y morfodinámico del área de influencia título 745, Figura 19. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-003, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.006 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.008.

En el análisis realizado por la ortofoto y del reconocimiento en campo, se identificaron principalmente 10 procesos morfodinámicos, todos ellos asociados a erosión superficial por la generación de surcos, cárcavas y erosión fluvial por socavación lateral en cauce, de carácter local, distribuidos en el área de influencia del título minero 745 mina La Esmeralda y las márgenes actuales del cauce río Coello, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.006.

Los procesos erosivos presentes en la zona de estudio están dados bajo condiciones naturales estables, identificando en el área de influencia erosión por escorrentía superficial y fluvial. La erosión en surcos se forma a partir de la concentración de agua de escorrentía, arrastrando partículas y a su paso formando canales poco profundos; generalmente se presentan paralelos ya que siguen la dirección de la pendiente, en este caso afectando suelos de las formaciones sedimentarias, volcánicas y los depósitos cuaternarios de morfología de terraza del título minero 745 mina La Esmeralda, ver Fotografía 28. Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.004 y Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.006. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001 y CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-003.

A continuación, se describen los procesos erosivos identificados en el área del título minero 745 de la mina La Esmeralda:

PM1. Surcos de erosión afectados por la escorrentía superficial de aguas lluvias sobre los depósitos cuaternarios, arenas puzolánicas en el área del título minero 745. Especialmente este proceso erosivo, tienen una longitud de 5 m, un ancho de 30 cm y una profundidad de 20 a 25 cm, Fotografía 28.



Fotografía 28. Generación de surcos de erosión afectando suelos de los depósitos cuaternarios (Qt) de arenas puzolánicas, PM1, título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 409; Coord. Norte 2 033 729.

Fuente: Elaboración propia.

PM2. surcos de erosión afectados por la escorrentía superficial, sobre los depósitos cuaternarios de arenas puzolánicas; se evidenciaron dentro del título minero 745 en taludes al norte, noreste y sureste de la misma. Estos procesos erosivos tienen una longitud que varían entre los 10 y 15 m, un ancho de 20 cm y una profundidad de 10 a 15 cm, Fotografía 29.



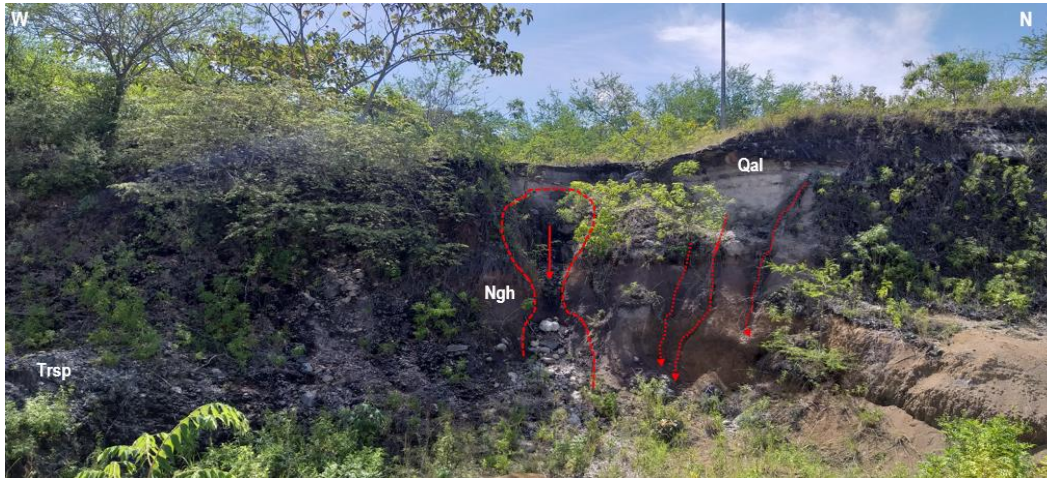
Fotografía 29. Generación de surcos de erosión afectando las paredes verticalizadas de la mina de puzolanas, depósitos cuaternarios (Qt), PM2, título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 550; Coord. Norte 2 033 731.

Fuente: Elaboración propia.

PM3. Generación de cárcava y surcos en la dirección del talud, afectando suelos y rocas de la formación Honda (Ngh), conformada por suelos arcillo-arenosos de grano fino con fragmentos de rocas ígneas y sedimentarias de tonos pardo a grisáceos y violáceos, subangulares a subredondeados, infrayacente se presentan arcillolitas rojizas a violáceas con concreciones arenosas. La cárcava posee una longitud de 3 m, un ancho de 1 m y una profundidad de 1,3 m, los surcos son generalizados en este talud, con longitudes entre 3 y 4 m, ancho de 15 cm y una profundidad de 20 cm; detonados

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

principalmente por las aguas de escorrentía superficial en épocas de lluvias y superficies desprovistas de vegetación que quitan el suelo soporte de estas unidades sedimentarias, dentro del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda, Fotografía 30.



Fotografía 30. Generación de cárcava y surcos de erosión afectando suelos de la formación Honda (Ngh) asociada a arcillolitas, PM3, título minero 6823, mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 260; Coord. Norte 2 033 548. Fuente: Elaboración propia.

PM4. Erosión superficial por socavación lateral de la margen izquierda del río Coello afectando rocas triásicas de las formaciones Payandé (Trsp) y Saldaña (Trjs), asociadas a calizas masivas grisáceas y rocas volcanoclásticas principalmente lutitas calcáreas, limolitas y calizas de la parte superior de la Formación Saldaña. Procesos erosivos que involucra la dinámica fluvial que ejerce el agua del río Coello, sobre esta margen del cauce, sobre las paredes verticalizadas de las rocas de la Formación Payandé y Saldaña y a los procesos de disolución dada la composición calcárea de estos materiales, adyacente al área del título minero 745, costado noreste de la mina La Esmeralda, Fotografía 31. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.006 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.007.



Fotografía 31. Erosión fluvial por socavación lateral margen izquierda del río Coello, afectando morfologías inclinadas en rocas calcáreas de la Formación Payandé (Trsp) y rocas asociadas a lutitas calcáreas de la Formación Saldaña (Trjs), PM4, adyacente al área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Coord. Este 4 767 072; Coord. Norte 2 033 901. Fuente: Elaboración propia.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

PM5. procesos erosivos menores, se presentan en el área del título minero 745 de la mina La Esmeralda, en su parte central y al este del área de influencia; corresponden a surcos por la escorrentía superficial de aguas lluvias sobre los depósitos cuaternarios aluviales (Qal). Estos materiales están constituidos por gravas de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, en una matriz de arenas finas a medias, cuarzosas, con esporádicas arcillas y líticos oscuros, de tonos grises a pardo amarillentos. Estos procesos se evidencian, adyacente a la banda transportadora de la mina La Esmeralda hacia la planta de Caracolcito, espacialmente tienen una longitud que varían entre 1 y 2 m, amplitud a escala centimétrica de 5 a 10 cm y una profundidad de 10 cm, Fotografía 32. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.006 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.007.



Fotografía 32. Generación de surcos de erosión afectando superficies que conforman la banda transportadora de la mina La Esmeralda en depósitos aluviales (Qal), PM5, título minero 745. Coord. Este 4 766 673; Coord. Norte 2 033 522
Fuente: Elaboración propia.

PM6. Generación de cárcava afecta suelos y rocas de la formación Saldaña (Trjs) al noroeste del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Involucra suelos arcillo-arenosos de grano fino con fragmentos de tobas y lutitas violáceas, seguido se presentan lutitas violáceas muy alteradas y fracturadas en láminas y capas muy delgadas de 5 cm de espesor, con algunas intercalaciones de tobas amarillentas, alteradas. La cárcava posee una longitud de 6 m, un ancho de 1,2 m y una profundidad de 1 m; proceso detonado principalmente por las aguas de escorrentía superficial en épocas de lluvias, paso de caballos y superficies desprovistas de vegetación, que quitan el suelo soporte de estas unidades volcanoclásticas, Fotografía 33. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.006 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.007.



Fotografía 33. Generación de cárcava de erosión afectando suelos y rocas de la Formación Saldaña (Trjs), PM6, asociada a arcillolitas, PM3, título minero 745 mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 343; Coord. Norte 2 033 866
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la ortofoto 2018, muestra la presencia de cuatro procesos erosivos, dos de ellos asociados con la generación de surcos de erosión sobre superficies desprovistas de vegetación en suelos de las unidades neógenas Honda (Ngh), PM7, conformada por arcillolitas (evidenciada en labor de campo, Fotografía 34) y otros surcos que afectan suelos de los depósitos de Caliche (Tsc), PM8, cuya matriz de carbonatos envuelve fragmentos de rocas de variada composición (Fotografía 35). Los otros dos corresponden a erosión fluvial por la generación de socavación lateral que afecta la margen derecha del río Coello sobre superficies del macizo rocoso verticalizadas en esta cuenca en rocas de la formación Payandé (Trsp), (PM9), (Fotografía 36) y rocas volcanoclásticas de la formación Saldaña (Trjs), PM10, (Fotografía 37); las cuales están asociadas a la dinámica actual del río y el grado de incisión que ejerce sobre el valle encañonado del río Coello. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GEOM-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.006 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.007. Figura 20 y Figura 27.

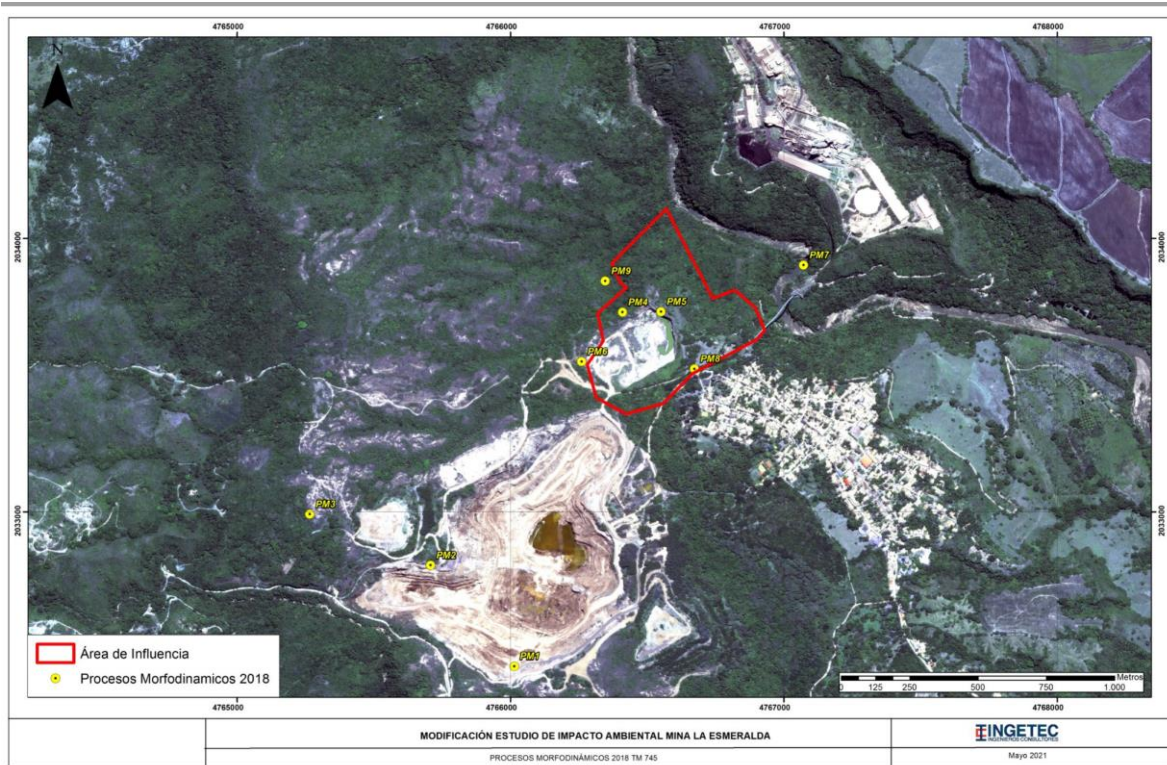


Figura 27. Distribución procesos morfodinámicos identificados en la foteinterpretación ortofoto 2018
Fuente: Elaboración propia

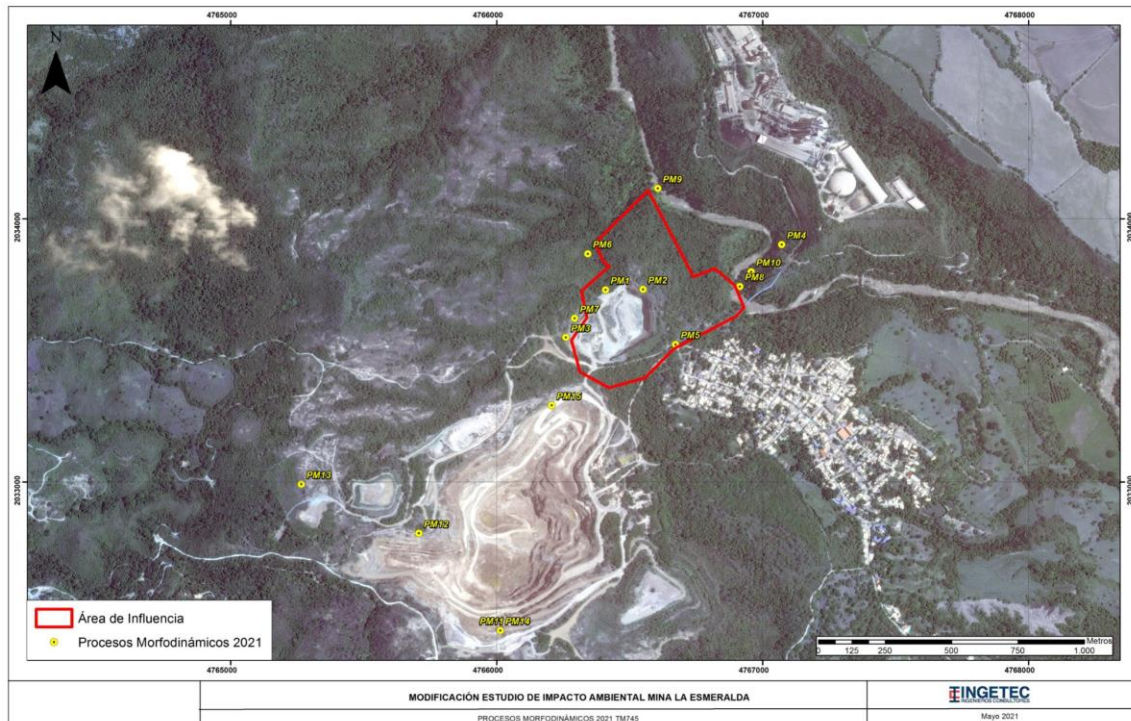


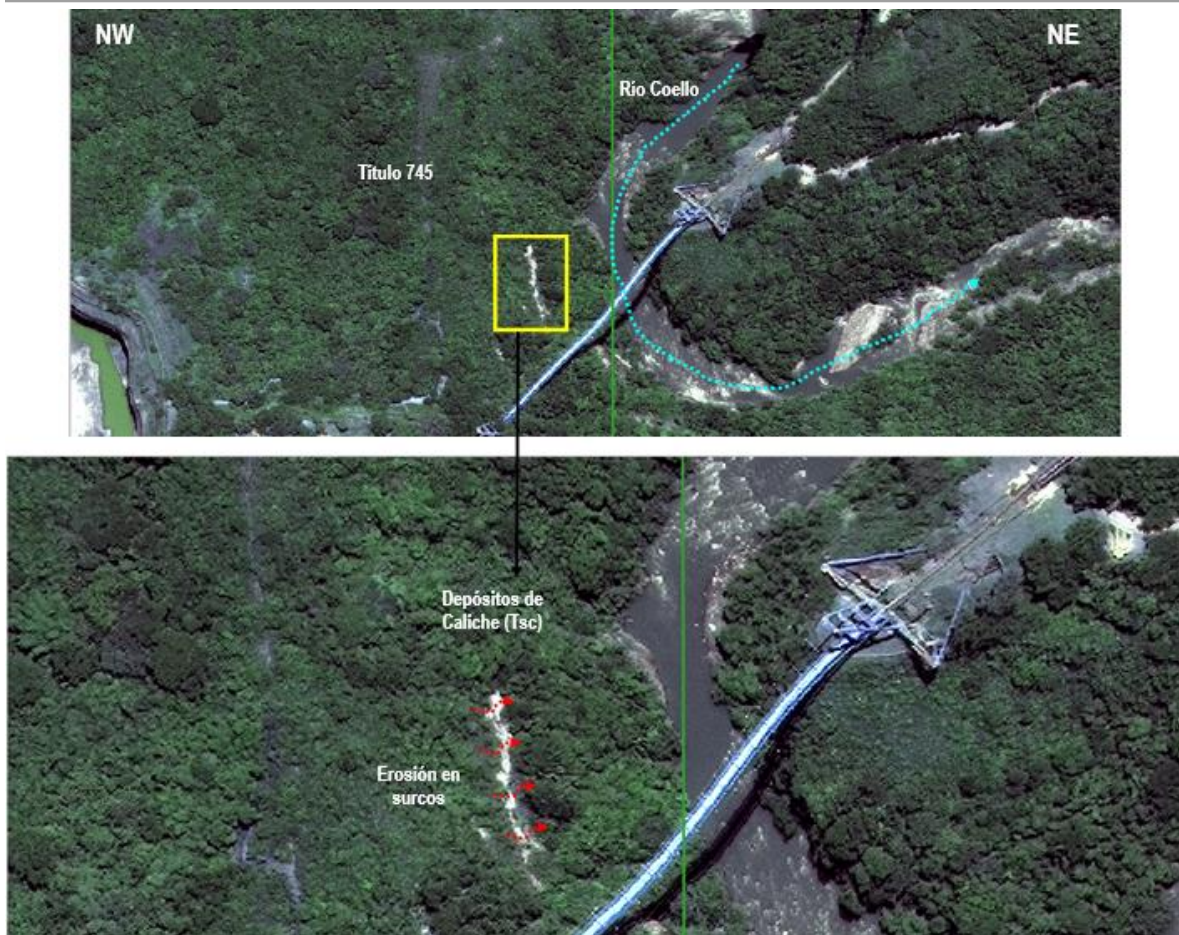
Figura 28. Distribución procesos morfodinámicos identificados en la foteinterpretación ortofoto 2020

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 34. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, y reconocimiento en campo (PM7), donde se observa erosión por escorrentía superficial en épocas de lluvias generando surcos de longitudes cortas hasta 5 m sobre superficies desprovistas de vegetación en rocas arcillolíticas de la formación Honda (Ngh) al oeste del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 293; Coord. Norte 2 033 621

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 35. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, (PM8); se presenta erosión por escorrentía superficial con surcos de longitudes cortas hasta 10 m sobre coberturas desprovistas de vegetación en la unidad depósitos de Caliche (Tsc). Coord. Este 4 766 914; Coord. Norte 2 033 742.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 36. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, (PM9); se presenta erosión fluvial por socavación lateral margen derecha del río Coello, en morfologías inclinadas asociadas a las rocas calcáreas de la Formación Payandé (Trsp). Coord. Este 4 766 606; Coord. Norte 2 034 115.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 37. Análisis de la ortofoto de 2018 a escala 1:1200, (PM10), se presenta erosión fluvial por socavación lateral margen derecha del río Coello, afectando morfologías inclinadas en rocas lutíticas y calcáreas de la Formación Saldaña (Trjs), al este del área del título minero 745 de la mina La Esmeralda. Coord. Este 4 766 957; Coord. Norte 2 033 797. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el análisis de la ortofoto para el año 2018 y los procesos erosivos identificados en el año 2020 a nivel de la fotointerpretación de la ortofoto y la verificación en campo a lo largo del título minero 745 y su área de influencia, prevalecen tres procesos erosivos (PM1, 2 y 5), exponen continuidad, sin evolución lateral, consisten procesos superficiales asociados a erosión laminar, tipo surcos y cárcavas, localizados al suroeste y sur del título minero 745; en particular, se presentan en geoformas estructurales y fluvio volcánicas depositacionales, con morfologías onduladas con pendientes moderadamente abruptas a ligeramente inclinadas, en rocas blandas terciarias del Grupo Honda (Ngh) y depósitos de Caliche (Tsc), y los depósitos fluvio volcánicos (Qt).

El análisis y fotointerpretación ortofoto 2020-2021, refleja procesos erosivos y de remoción en masa que se ubican por fuera del área de influencia del título minero 745, en la zona del escarpe asociado al cauce activo del río Coello en su margen izquierda, Figura 27. Los procesos morfodinámicos en mención no afectan el área del proyecto ni las actividades proyectadas asociadas a la explotación de las arenas de puzolanas de los depósitos de terrazas fluvio volcánicas (Qt).

5.1.3. Amenazas geológicas

5.1.3.1. Amenaza Volcánica

La amenaza volcánica está representada en Colombia por una serie de volcanes activos o potencialmente activos distribuidos a lo largo de la cordillera central del país. Los volcanes tienden a distribuirse como cinturones lineales largos, cercanos a los límites donde convergen las placas corticales. Tal es el caso del Parque Nacional de los Nevados, situado en los Andes Colombianos, donde la Cordillera Central alcanza sus mayores alturas; está conformado por los volcanes activos de Cerro Bravo, Ruiz, Santa Isabel, Tolima y Machín.

Un volcán es un punto de la tierra que se encuentra directamente comunicado con la astenosfera, parte semi-líquida de la tierra donde se encuentra roca fundida, la cual puede ascender a la superficie por aumento de la presión interna, acompañada de gases y fluidos incandescentes.

De esta manera se tiene que un volcán puede generar varios productos:

- Caída de Piroclastos: Material arrojado a la atmósfera de tamaños variables. Pueden alcanzar grandes distancias sobre todo las partículas más finas.
- Flujos de lava: Roca fundida incandescente que se extiende desde el punto central de emisión. Alcanza cortas distancias.
- Flujo de Piroclastos: Masa seca e incandescente que es expelida con gran violencia a lo largo de las paredes de un volcán. Recorren distancias relativamente cortas, vecina a la base de la estructura volcánica.
- Flujos de Lodo: Los lahares (llamados comúnmente avalanchas y flujos de lodo) son una mezcla de fragmentos de roca, arena, limo y agua que se desplazan por los valles de las quebradas y ríos a velocidades de decenas de kilómetros por hora. Se generan, al tiempo y después de las erupciones volcánicas, por una variedad de mecanismos que permiten la mezcla de flujo de agua con materiales volcánicos y no volcánicos. Las fuentes de agua para formar lahares pueden provenir de nieve, de hielo, de lagos cráteres, de lluvias y de corrientes fluviales (SGC, 2003).

Para espacialmente entender y dimensionar el contexto del proyecto, este se encuentra a 166 km de distancia desde Bogotá D.C. (2.600 m.s.n.m.), saliendo por la autopista sur, conduciendo del municipio de Soacha (Cundinamarca) a Ibagué (Tolima) en dirección suroeste, tomando la vía 40, pasando por los municipios de Fusagasugá (Cundinamarca), Melgar (Tolima) que está a 323 m.s.n.m., donde se sigue en dirección oeste, se cruza el río Magdalena y continuando hasta el corregimiento de Gualanday (municipio de Coello, Tolima), donde se toma la vía 40 TLE (variante Ibagué – Armenia) durante 2,4 km hasta el retorno, se toma la salida que conduce vía Guamo – San Luis, y a 6,8 km se llega al corregimiento de Payandé. 300 m al noroeste de Payandé está la entrada a la mina La Esmeralda.

El volcán Cerro Machín (VCM) se encuentra situado en la Cordillera Central de Colombia, se localiza en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia a 17 km al occidente de la ciudad de Ibagué (Tolima), ver Figura 25. Por la composición química, magnitud y extensión de sus erupciones pasadas, se reconoce como un volcán explosivo. El volcán Cerro Machín, presenta un cono volcánico conformado por un complejo de anillos piroclásticos, un cráter de 2,4 km de diámetro mayor taponado por domos con actividad fumarólica y su edificio volcánico está construido directamente sobre rocas metamórficas y su altura varía entre 100 y 300 m. Ha producido seis periodos eruptivos (cuatro plinianos y dos por colapso de domos) durante el Holoceno, el último hace 800 años; ha producido domos, columnas de erupción mayores de 20 km de altura sobre el cráter, flujos y oleadas piroclásticas y grandes volúmenes de depósitos de lahares (flujos de escombros e hiperconcentrados) que cubren un área un poco mayor a 1 000 km² hacia el este, en el valle del río Magdalena. Los

productos del volcán Cerro Machín tienen composición dacítica⁷. El Volcán Cerro Machín, es uno de los volcanes que más interés despierta en el país debido a su alto potencial explosivo y gran extensión alcanzada por sus depósitos⁸, Figura 28.

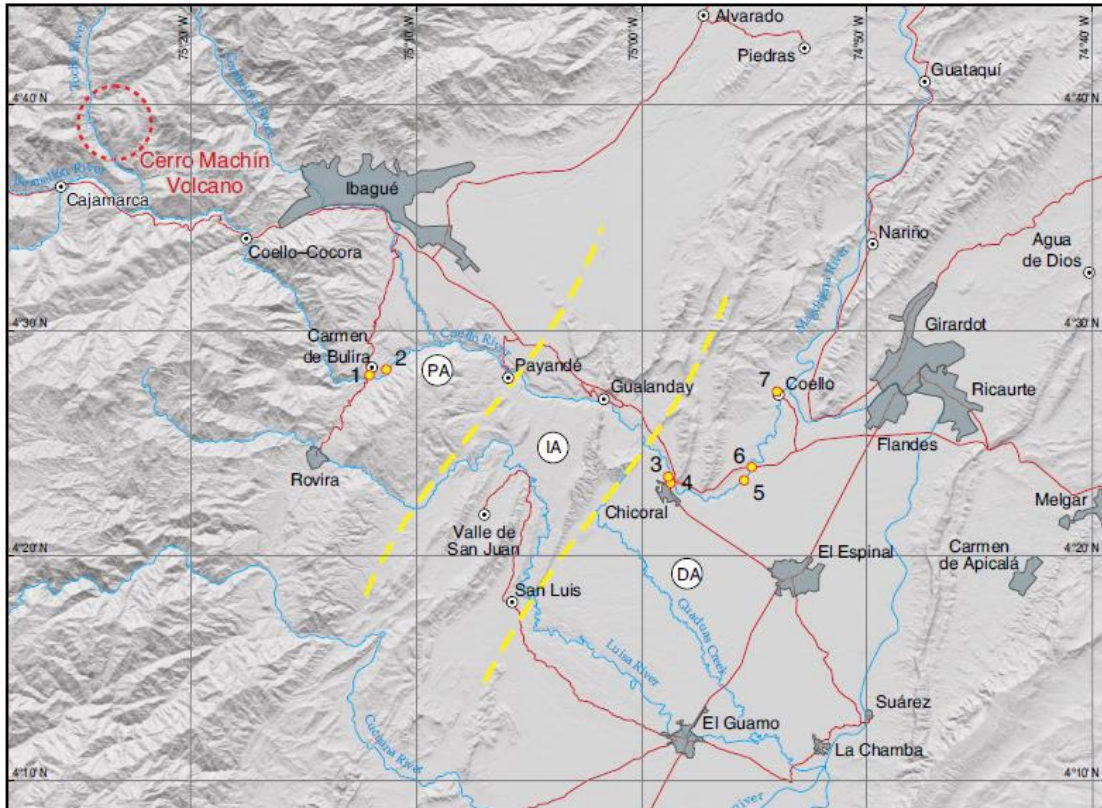


Figura 29. Localización geográfica del Volcán Cerro Machín y el corregimiento de Payandé Tolima
Fuente: Tomado y adaptado de INGEOMINAS, 2018.

Los primeros estudios de los volcanes activos en Colombia, dieron lugar a lo que erróneamente se denominó como mapas de riesgo volcánico. Si bien, eran mapas que relacionaban algunos impactos esperados, no consideraban otros aspectos propios del contexto, como por ejemplo, las condiciones socioeconómicas de las comunidades afectadas. Posteriormente, con estudios y mayor investigación, se optó por denominarlos mapas de amenaza volcánica, haciendo énfasis en los fenómenos geológicos propiamente dichos.

Los estudios realizados para el VCM, analizan el escenario eruptivo potencial teniendo en cuenta: a) un sistema volcánico con un magma rico en volátiles, taponado en superficie por domos, con zonas de debilidad alrededor del tapón, las cuales podrán ser aprovechadas para iniciar la limpieza del conducto, la producción de la(s) erupción(es) principal(es), la destrucción de los domos y el subsecuente destaponamiento del cráter; b) la presencia de la cuenca confinada del río Coello que encausará la gran mayoría de los flujos y las oleadas piroclásticas, por valles estrechos y profundos, con corrientes caudalosas que favorecerían la formación de lahares (Ibid).

En orden de su potencialidad de causar daños, las zonas de amenaza volcánica del Cerro Machín han sido determinadas por el Ingeominas (2002) hoy SGC, en zonas de amenaza por flujos piroclásticos, zonas de amenaza por flujos hiperconcentrados (avalanchas o flujos de lodo) y zonas de amenaza por caída de piroclastos, Figura 29.

⁷ INGEOMINAS, 2002. Evaluación de la amenaza volcánica potencial del Cerro Machín, Departamento del Tolima, Colombia, Manizales

⁸ Cortés, G.P. 2001. Estudio geológico de los depósitos del Lahar asociados a la actividad eruptiva del Volcán Cerro Machín. Colombia INGEOMINAS.

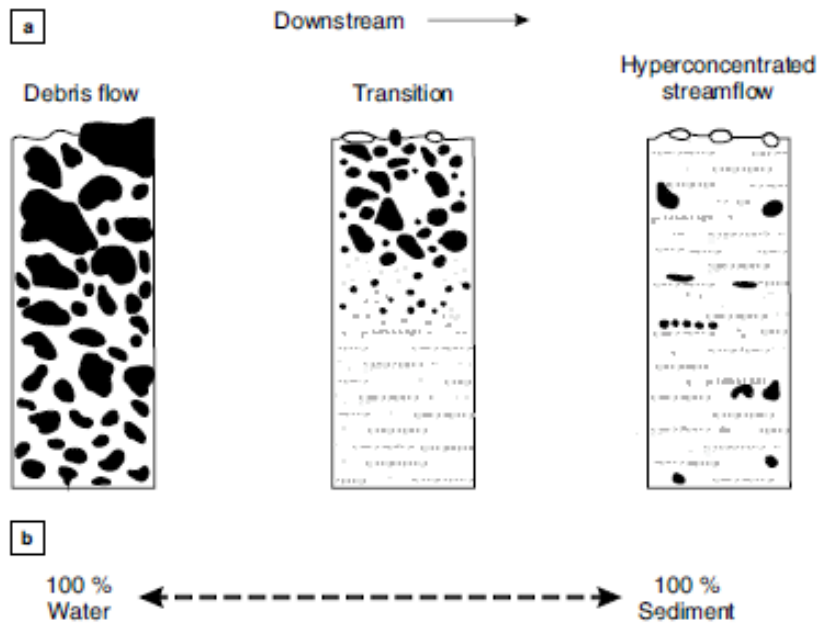


Figura 30. Secuencia estratigráfica (esquemática) sección transversal sector de Gualanday río Coello (60 km) Cerro Machín

Fuente: Tomado y adaptado de INGEOMINAS, 2018.

De acuerdo con la clasificación de Amenaza volcánica realizada por el Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS), ver Figura 26 en el área del proyecto, el volcán Cerro Machín se considera como activo, básicamente por haber presentado erupciones en los últimos 10.000 años. Las fumarolas y fuentes termales que presenta, pueden evidenciar el proceso de enfriamiento o actividad atenuada actualmente.

En la historia del volcán Cerro Machín, los flujos piroclásticos han tenido tres (3) formas principales de originarse, por lo cual, aparecen tres (3) zonas de amenaza por este tipo de evento. Estas zonas son las llamadas Zona de Amenaza por flujos piroclásticos de ceniza y pómez, Zona de Amenaza por oleadas piroclásticas y Zona de Amenaza por flujos de bloques y ceniza. Cubren 240 km² e incluye centros poblados como Cajamarca, Anaime, Corregimiento de Coello, Toche y Tapias.

Los lahares (llamados comúnmente avalanchas y flujos de lodo) son una mezcla de fragmentos de roca, arena, limo y agua que se desplazan por los valles de las quebradas y ríos a velocidades de decenas de kilómetros por hora. Las fuentes de agua para formar lahares pueden provenir de nieve, de hielo, de lagos cratéricos, de lluvias y de corrientes fluviales. En el mapa aparecen varias zonas de amenaza por lahares, debido a: (i) la manera cómo se pueden originar los lahares; (ii) los tipos de lahar que resulten, lo cual implica comportamientos diferentes y (iii) las características morfológicas o forma del paisaje por donde pueden pasar los flujos.

Estas zonas son las llamadas en el mapa como Zona de Amenaza por flujos hiperconcentrados, la cual tiene cinco divisiones y la Zona de Amenaza por flujo de escombros.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, los eventos de ocurrencia más probable en el área del título minero 745, son los flujos de lodo (lahares), principalmente Flujos de Escombros y Flujos Hiperconcentrados. La definición de cada una de las categorías de este fenómeno se describe en la Tabla 7.

Tabla 7. Descripción de las zonas de Amenaza por Lahares que afectaron el título minero 745

Nombre del Volcán	Fenómeno Volcánico	Categoría Específica del Fenómeno	Zona o Subzona	Descripción
Volcán Cerro Machín	Zonas de Amenaza Por Lahares	Zona de Amenaza Por Flujos de Escombros		Las zonificación de amenaza por lahares tipo flujo de escombros se realizó, a partir del escenario máximo denominado Chicoral (escenario 2.500 años AP), considerando básicamente los mismos criterios generales tenidos en cuenta para los flujos hiperconcentrados. Dependiendo de la magnitud de este tipo de lahares, se espera que éstos ocurran principalmente en tres de las cinco zonas consideradas para flujos hiperconcentrados (zonas 2, 3 y 4), y cubran un área aproximada de 50 km ² . Estos flujos se caracterizan por generar grandes represamientos, por ser altamente canalizados por los cauces de los ríos y, por ende, por presentar una menor distribución lateral en comparación con los flujos hiperconcentrados. Las amenazas primarias de los flujos de escombros para las personas, las estructuras, la infraestructura y los cultivos incluyen: Arrasamiento y destrucción de las estructuras existentes a lo largo de su trayectoria (puentes, casas en las orillas de los ríos). Inundación de las regiones aledañas en el caso de presentarse represamiento de los ríos. Enterramiento de las zonas aledañas a las orillas de los ríos por desbordamientos originados por desconfinamiento de los flujos
		Zonas de Amenaza Por Flujos Hiperconcentrados	Flujo hiperconcentrado Zona 4	La zona 4 corresponde al área perteneciente a los valles de los ríos Coello y Magdalena, que inicia en la Inspección de Policía de Coello y continúa hasta Nariño.
			Flujo hiperconcentrado Zona 5	La zona 5 corresponde principalmente al denominado abanico del Guamo. Comprende el área entre el sector de Payandé y el río Magdalena, la cual se determinó considerando que los lahares se desborden, como en el pasado, desde el río Coello en las cercanías de Payandé, hacia los cauces de los ríos Luisa, Cucuana, Saldaña y Magdalena.

Fuente: Ingeominas. Evaluación de la Amenaza Potencial del Volcán Cerro Machín Nombre del documento. (2002).

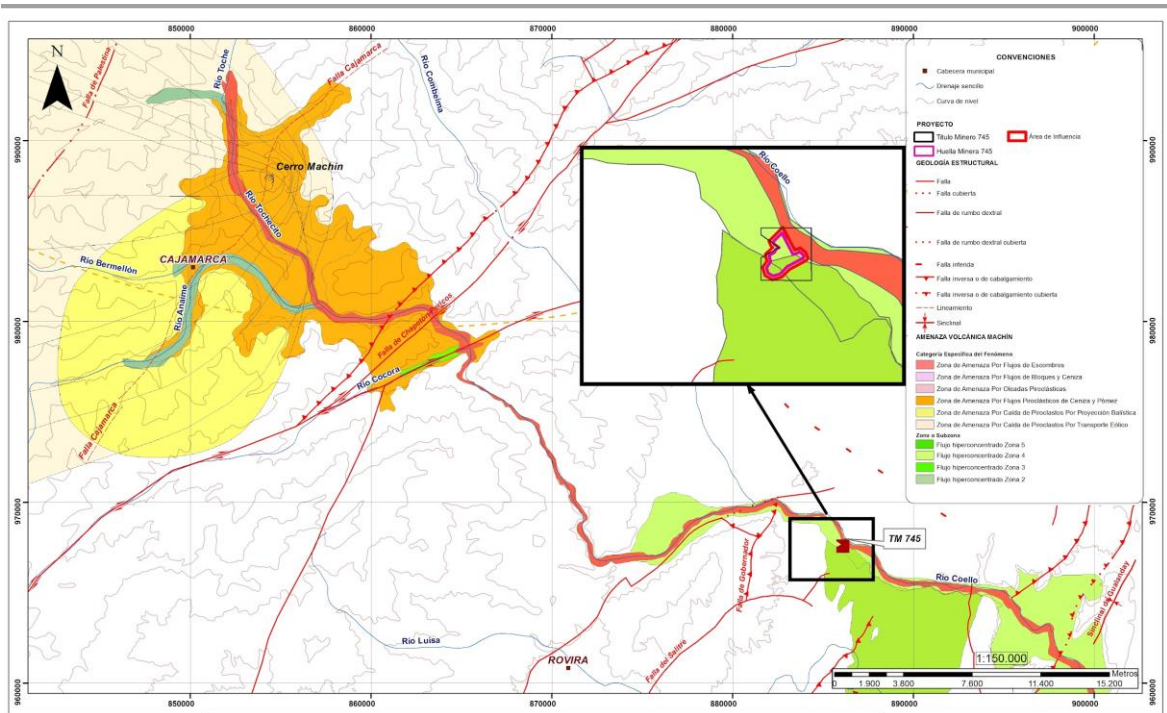


Figura 31. Mapa de amenaza volcánica del Volcán Machín, para el título minero 745.
Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Mapa de amenaza del Volcán Machín (2003)

Para realizar el diagnóstico de la actividad volcánica en el VCM, el SGC lleva a cabo un monitoreo continuo y permanente del volcán basado en la observación visual y la aplicación de diferentes técnicas especializadas (geofísica, geodesia, geoquímica y geovulcanología) que le permiten estar atento a la evolución del fenómeno volcánico.

Con base en el análisis de la información obtenida a partir del monitoreo sismológico realizado en el volcán, se evidencia que el VCM continuó mostrando cambios en su comportamiento. La sismicidad, aunque es de baja energía, presentó un aumento en el número de eventos. Se registraron varios incrementos de sismicidad tipo VT, que se localizaron como en meses anteriores en los flancos sur-suroccidental, sur y suroriental del domo, principalmente.

En abril de 2021, el volcán Cerro Machín tuvo actividad sísmica asociada a fracturamiento de rocas. Esta actividad sísmica, respecto a marzo, disminuyó levemente en el número de eventos registrados y en la energía sísmica liberada. Los sismos se localizaron principalmente en los sectores sur y sur-suroccidente del domo principal y, en menor proporción, al sur-suroccidente de la estructura volcánica, a profundidades entre 1,2 y 8,5 km. Se destaca el incremento de sismicidad del 25 de abril, localizado al sur y al sur-suroccidente del domo principal, a profundidades entre 1,3 y 4,0 km. El sismo de mayor magnitud fue de 2,5 ML (magnitud local), registrado a las 20:05, localizado 0,4 km al sur del domo principal, a 4,0 km de profundidad; este evento sísmico fue además el de mayor magnitud durante el mes⁹.

De acuerdo con los parámetros evaluados en marzo y su relación con los demás datos obtenidos hasta el momento en el monitoreo continuo del volcán, el SGC establece que la deformación volcánica, medida a partir de inclinómetros electrónicos y de estaciones GNSS (Sistema Satelital de Navegación Global), no registra cambios en la estructura volcánica (Ibid). El volcán Cerro Machín, se encuentra en reposo y no presenta signos que indiquen que vaya a salir de ese estado de acuerdo con el registro de vigilancia volcánica del SGC, Anexo CAP5.1-CMAB-LES6823-AN#5.1.001.

⁹ SGC, 2021. Boletín Informativo Monitoreo Red Volcánica Complejo Ruiz Tolima.

5.1.3.2. Amenaza sísmica

En el contexto sísmico, Colombia está situada en un área de convergencia de placas tectónicas, siendo la placa Suramérica y la placa de Nazca las que generan subducción afectando todo el territorio, siendo una región con amenaza sísmica.

La liberación de la energía elástica acumulada por los movimientos de estas placas ha producido efectos demoledores en el país durante los últimos siglos (Popayán 1736, Bogotá 1785, Mariquita y Honda 1805, y los recientes en los departamentos de Caldas, Huila y Tolima).

Además, de las placas tectónicas, otras estructuras a través de las cuales se libera gran cantidad de energía elástica son las fallas geológicas, no solo las que se encuentran en la zona estudiada, sino las que también se disponen en áreas vecinas. Esta disposición se conoce como fuentes sismogénicas, tales como las fallas de Ibagué, Cucuana y Palestina.

El marco tectónico regional, muestra que el área del título minero 745, se encuentra en una zona de amenaza sísmica media afectada por las fallas regionales principalmente estructuras NE, asociadas a un patrón tectónico de tipo compresivo, con el desarrollo de grandes fallas inversas y de tipo transformacional, la cual ha tenido su desarrollo desde el cretáceo hasta el cuaternario, íntimamente ligadas a los procesos orogénicos de levantamiento de las actuales cordilleras que ha dado como resultado una tectónica compleja. La cercanía a fallas clasificadas como activas requiere un análisis de la sismicidad asociada con el área de estudio regional para tal fin se analiza la amenaza sísmica del catálogo del Servicio Geológico Colombiano.

Regionalmente, en el área se presentan dos tipos de fuentes dominantes. En primer lugar, están las fuentes cercanas e intermedias que establecen una amenaza significativa como es el caso de las fallas que hacen parte de los sistemas Ibagué, Cucuana, Romeral y Palestina, cuyo trazo se encuentra sobre las cuencas o a pocos kilómetros de las mismas. Estas fuentes locales y regionales, aunque no son generadoras de grandes sismos, se encuentran a distancias lo suficientemente pequeñas como para generar fuertes intensidades sísmicas en las zonas de estudio.

Otro tipo de fuentes son las fuentes existentes a mayores distancias, pero con gran capacidad de liberación de energía. Se hace referencia a la zona de Benioff intermedia la cual se encuentra justo debajo de la ciudad de Ibagué, a una profundidad aproximada entre 100 y 150 km. Estas fuentes han causado muchos movimientos sísmicos importantes en la zona tales como el sismo de Pereira de 1995 el cual generó pérdidas apreciables en la ciudad.

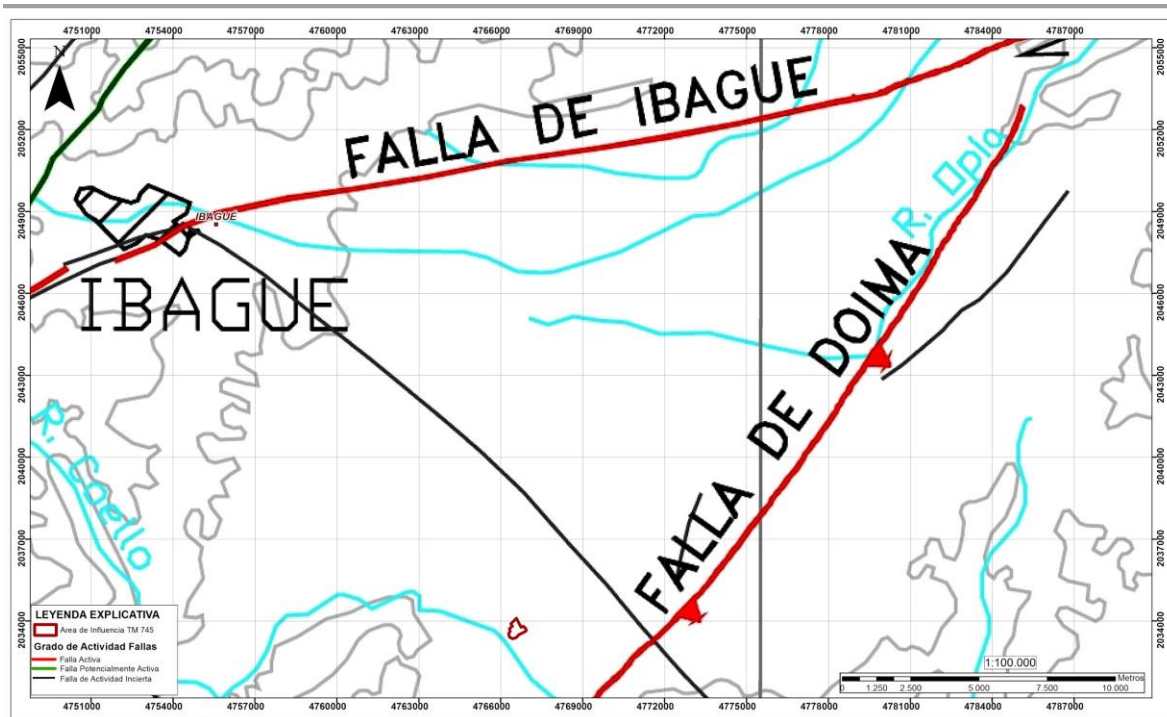


Figura 32. Localización del Área de Influencia del TM745 en el mapa de Fallas activas de Colombia
Fuente: Base de Datos de Fallas Activas de Colombia. Ingeominas, 2001.

El área de Influencia del TM 745 se localiza cerca de la Falla de Ibagué y la Falla de Doima, estas fallas son catalogadas por el Servicio Geológico Colombiano como activas (Montes y Sandoval, 2001). La traza de la Falla de Ibagué cruza la ciudad de Ibagué, sobre el piedemonte oriental de la Cordillera Central, en dirección N80°E. Afecta los depósitos volcanoclásticos cuaternarios del Abanico de Ibagué, de edad Pleistoceno, como también un manto de recubrimiento de piroclastos de caída del Holoceno. El bloque sur por lo general está levantado con respecto al bloque norte. RAASVELDT y CARVAJAL (1956) fueron los primeros en cartografiar la ruptura cuaternaria en el Abanico de Ibagué. DIEDERIX y otros (1987) calcularon 600 m. de desplazamiento de rumbo, con base en un lomo cortado por la falla. El tipo de movimiento de la falla de Ibagué es dextral, acompañado de un movimiento menor en sentido vertical (Montes y Sandobal, 2001).

La Falla de Doima, corresponde a la prolongación hacia el norte de la Falla Samaria-La Colorada. La falla Doima marca el límite estructural de la parte distal del Abanico de Ibagué, colocando en contacto el Abanico con rocas sedimentarias marinas del Cretácico y rocas sedimentarias clásticas del Terciario situadas al oriente. La traza de falla sigue el rumbo de los ejes sinclinales y anticlinales y parece tener leve flexión hacia el noreste, al acercarse a la falla de Ibagué (Montes y Sandobal, 2001).

El área de influencia del proyecto, se encuentra localizado en el corregimiento de Payandé en el municipio de Valle de San Luis (Tolima), el cual según la normativa de construcción vigente en el país (NSR-10) es clasificado como de amenaza sísmica alta con valores de Aa (equivalente a la aceleración del terreno o PGA) y Av (valor de aceleración utilizado para determinar el rango de periodos de la plataforma con aceleración espectral uniforme) mayor a 0,20 g para un periodo de retorno de 475 años (NSR-10), Figura 32 y Tabla 8.

Tabla 8. Zona de amenaza sísmica para el municipio San Luis (Tolima) y los valores de Aa, Av, Ae y Ad.

Departamento del Tolima						
Municipio	Código Municipio	Aa	Av	Ae	Ad	Zona de Amenaza Sísmica
Valle de San Juan	73854	0,25	0,20	0,10	0,06	Alta
San Luis	73678	0,25	0,20	0,10	0,06	Alta
Ibagué	73001	0,20	0,20	0,15	0,08	Intermedia

Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. NSR-10 (2010).

- Zona de amenaza sísmica baja — Es el conjunto de lugares en donde tanto Aa como Av son menores o iguales a 0,10.
- Zona de amenaza sísmica intermedia — Es el conjunto de lugares en donde Aa o Av, o ambos, son mayores de 0.10 y ninguno de los dos excede 0,20.
- Zona de amenaza sísmica alta — Es el conjunto de lugares en donde Aa o Av, o ambos, son mayores que 0.20.

Donde;

Aa: es el “coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño”¹

Av: es “coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva, para diseño”.

El mapa nacional de amenaza sísmica fue realizado para un periodo de retorno 475 años, donde el “mapa de amenaza sísmica representa un modelo probabilístico para el movimiento del terreno que podría esperarse por la ocurrencia de sismos en Colombia. El movimiento del terreno se calcula en términos de aceleración horizontal máxima en roca (PGA), y se estima para probabilidades del 2%, 10% o 50% de ser sobrepasado en un tiempo de 50 años, tiempo estimado de vida útil de una construcción corriente. Estas probabilidades se asocian con la frecuencia de ocurrencia (o periodo de retorno) de los sismos potencialmente destructores: de ocurrencia excepcional (periodo de retorno de 475 años), frecuentes (periodo de retorno de 475 años) o muy frecuentes (periodo de retorno de 75 años)” (Figura 32).

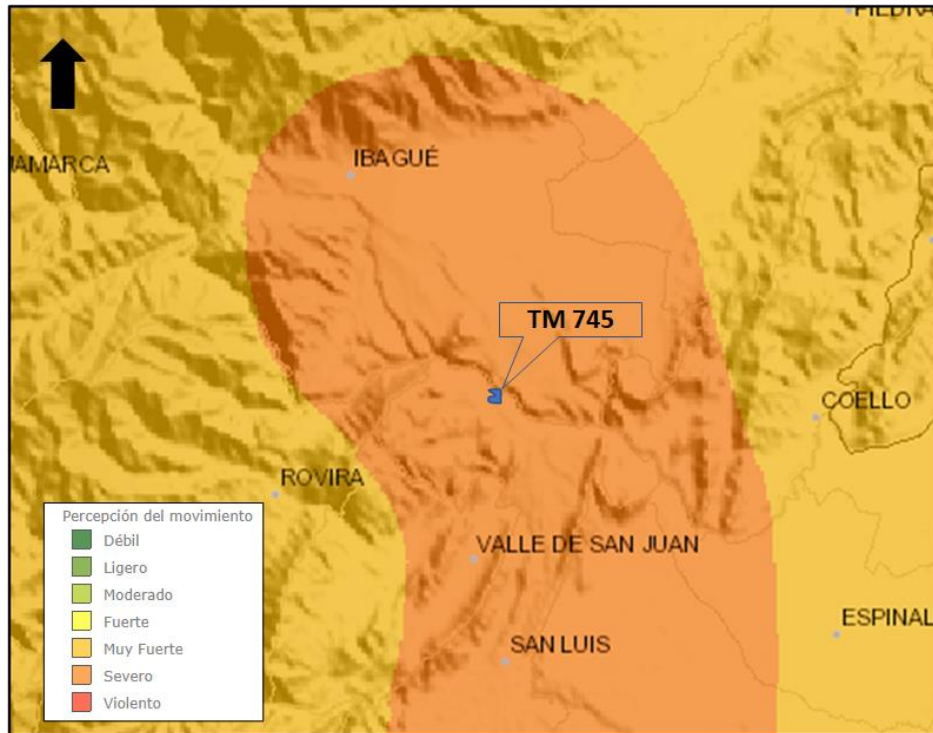


Figura 33. Zonificación Sísmica Intensidad Esperada en el municipio de San Luis (Tolima) (Catálogo sísmico RSNC)
Fuente: Catálogo de sismicidad del Servicio Geológico Colombiano, 2018.

La Figura 33 presenta una imagen del catálogo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) (1993-2018) en donde se presentan los sismos con magnitud igual o superior a 1,0 (MI) del departamento del Tolima. Como se puede observar la sismicidad cercana al sitio de estudio presenta profundidades superficiales ($0\text{km} < \text{Profundidad} \leq 30\text{ km}$) y se encuentran epicentros de sismos corticales ($\text{Profundidad} \leq 30\text{ km}$).

El evento más relevante (dada su magnitud) cercano a la zona de estudio corresponde al sismo que se presentó el 14 de enero de 2013 con magnitud 3,0 (MI) y profundidad de 13,6 km, evento que se localizó (RSNC) a una distancia epicentral de aproximadamente 1 km del sitio de estudio. El evento más cercano a la zona de estudio corresponde al sismo ocurrido el 16 de enero de 2003 con magnitud 2,1 (MI) y profundidad de 4,1 km, sismo que se localiza a aproximadamente 0,8 km del polígono del AI.

En general se encuentra que el catálogo sísmico de la RSNC permite indicar la clasificación del sitio de estudio como de amenaza sísmica intermedia al presentar sismos cercanos de baja magnitud, sin que se observe una zona con gran recurrencia de eventos sísmicos.

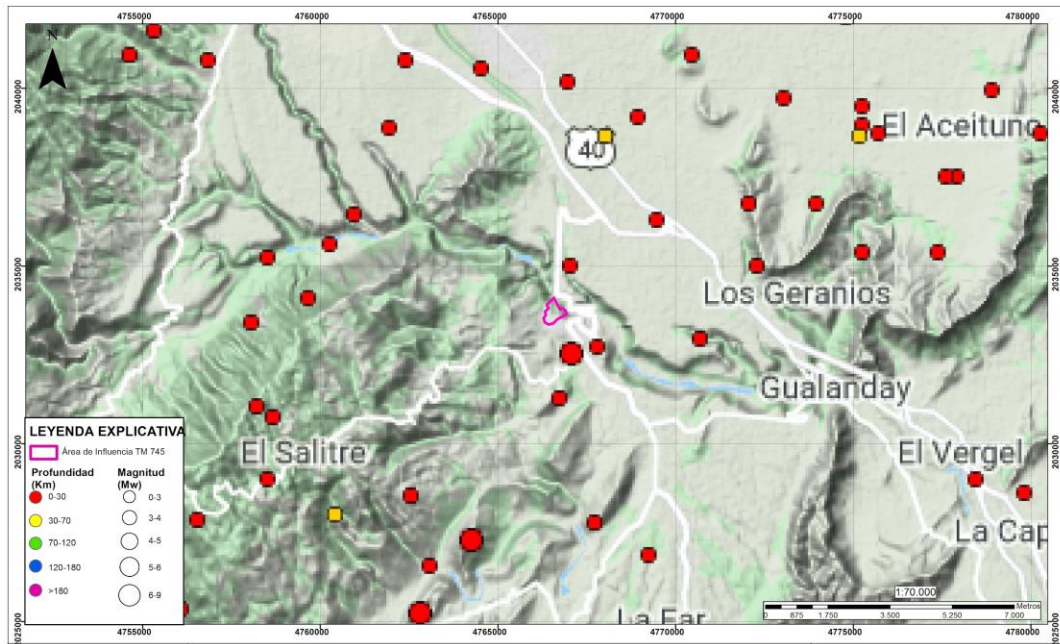


Figura 34. Localización del área de influencia del título minero 745 en el mapa del Catálogo sísmico de la Red Sismológica Nacional (1993-2018)

Fuente: Catálogo de sismicidad del Servicio Geológico Colombiano, 2018.

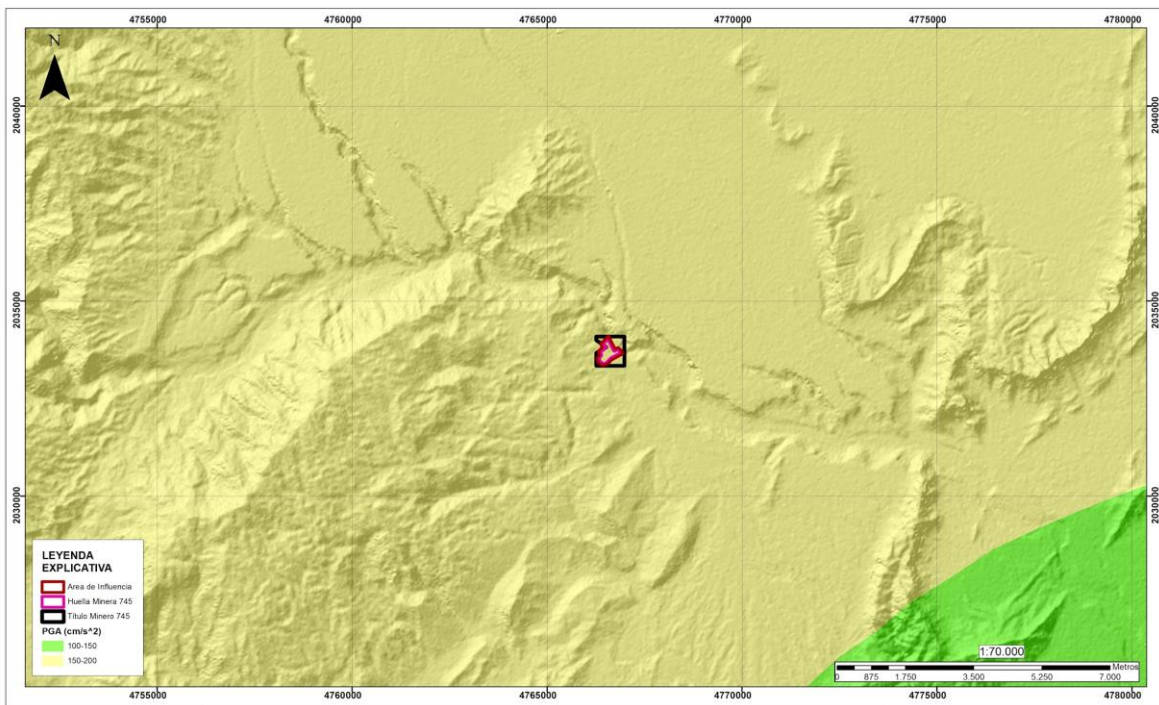


Figura 35. Localización del área de influencia del título minero 745 en el mapa de Amenaza Sísmica de la Red Sismológica Nacional (2020).

Fuente: SGC. Red Sismológica Nacional. (2020).

5.1.3.3. Amenaza por procesos de remoción en masa

Teniendo en cuenta que en Colombia, los deslizamientos ocurren frecuentemente en períodos de precipitaciones intensas y continuas, las cuales dependen de las oscilaciones climáticas, incidiendo en la dinámica de los suelos del país, al servir de detonante de movimientos en masa. Como consecuencia de la degradación mecánica y de la sismicidad generada principalmente en los sistemas de falla, se han originado o reactivado en el país muchos deslizamientos. También ocurren por la intervención del hombre en actividades como cambios indebidos en el uso del suelo, prácticas inconvenientes de manejo y a invasión de la zona de reserva forestal con actividades inapropiadas, cortes para vías y viviendas en zonas con altas pendientes, vertimiento incontrolado de aguas en las laderas, intervención humana sobre los ríos o quebradas, obligándolos a socavar sus orillas y/o a cambiar su cauce.

A partir de la zonificación de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa de Ingeominas (2010), Figura 35, define para el área del título minero 745 localizado en el corregimiento de Payandé en el municipio de San Luis (Tolima) como una zona con amenaza alta a media. Los relieves montañosos existentes en la zona de estudio presentan alta susceptibilidad a los procesos erosivos, teniendo como principal influencia la precipitación, las tipologías de rocas, los procesos de alteración y la cobertura vegetal. Las rocas de la Formación Payandé consiste principalmente por una secuencia calcárea marina, conformada por intercalaciones de caliza de grano medio a grueso de color gris claro a medio, dispuestas en capas tabulares con espesores decimétricos a métricos, con laminación interna y las rocas del Grupo Honda compuesto por arenitas líticas con intercalaciones de arcillolitas de color gris verdoso y conglomerados, en su mayoría se localizan en las zonas más húmedas donde fácilmente son meteorizadas, dando como resultado niveles de alteritas que son susceptibles a la remoción ya sea por saturación de suelos y aumento de su plasticidad o por generación de sismos, factores que se aúnan en algunas zonas por el cambio de pendientes.

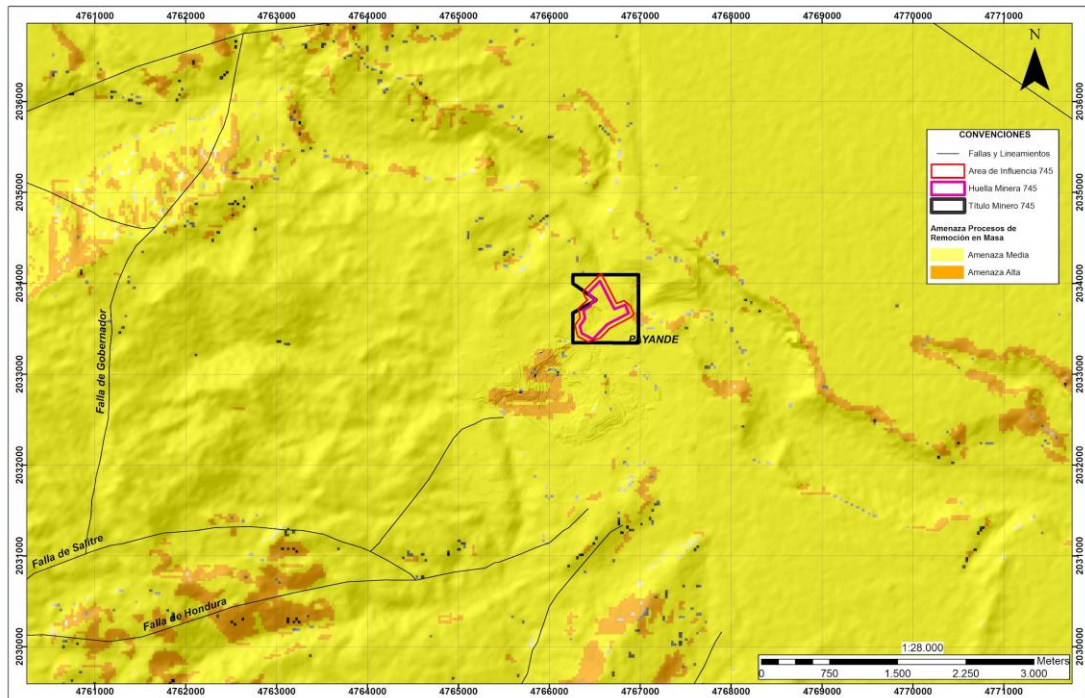


Figura 36. Localización del área de estudio en el mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa (escala 1:500.000).

Fuente: SGC. Amenaza relativa por movimientos en masa. (2010).

5.1.4. Paisaje.

El paisaje es la expresión espacial y visual del medio¹⁰ y presenta una alta fragilidad a los cambios que sobre él se realicen dependiendo de los atributos que lo componen. El análisis del paisaje visual considera la estética y la capacidad de percepción de los observadores, en este caso, los habitantes presentes en el proyecto. Se presenta a continuación la descripción de los atributos que componen el paisaje, así como el análisis que desde el punto de vista de la percepción de paisaje se establece mediante la composición que provocan dichos atributos en el medio.

El análisis de paisaje se realizó sobre el área de influencia delimitada para el componente paisaje, la cual se delimitó teniendo en cuenta los observadores presentes en el área de estudio y sus alrededores, las características del relieve y la escala visual a la que estos pueden identificar las modificaciones que se realizan al medio. A continuación se describen las características del paisaje actual.

5.1.4.1. Atributos del paisaje

Para el área de influencia del proyecto, se encontró que los principales elementos que caracterizan el paisaje son las coberturas de la tierra, los cuerpos de agua, las actuaciones antrópicas entendidas estas como las modificaciones totales del ecosistema (el tejido urbano, la infraestructura vial y zonas de extracción minera) y la distribución del relieve. Se presenta a continuación una breve descripción de las características de estos elementos.

5.1.4.1.1. Elementos físicos del paisaje: relieve

En el área de paisaje, predominan las superficies con un “relieve variado, formas interesantes” las cuales ocupan una superficie de 56,08%, las cuales son superficies que presentan pendientes entre 12 y 50%, seguidas por las pendientes con un valor que oscila entre el 0 y 12% (32,37%). Por lo general el relieve es inclinado a ligeramente escarpado con algunas colinas aisladas dentro del área de influencia del paisaje.

En la Tabla 9 y Figura 36 se presenta la distribución de la pendiente para el área de influencia de paisaje. El relieve es un factor de importancia en la visibilidad de los observadores; pendientes planas se asocian con una menor visibilidad en planos lejanos, mientras que las pendientes inclinadas, empinadas o escapadas presentan una mayor visibilidad en los planos lejanos.

Tabla 9. Distribución de las Pendientes en el Área de Influencia

Clasificación	Área (ha)	Proporción
Colinas suaves, fondos planos	4,82	32,37%
Relieve variado, formas interesantes	8,35	56,08%
Relieve muy montañoso	1,72	11,55%
Total	14,89	100%

Fuente: Elaboración propia.

¹⁰ BOLÓS, M. (1992). Manual de ciencia del paisaje: teoría, métodos y aplicaciones. Barcelona: Masson.

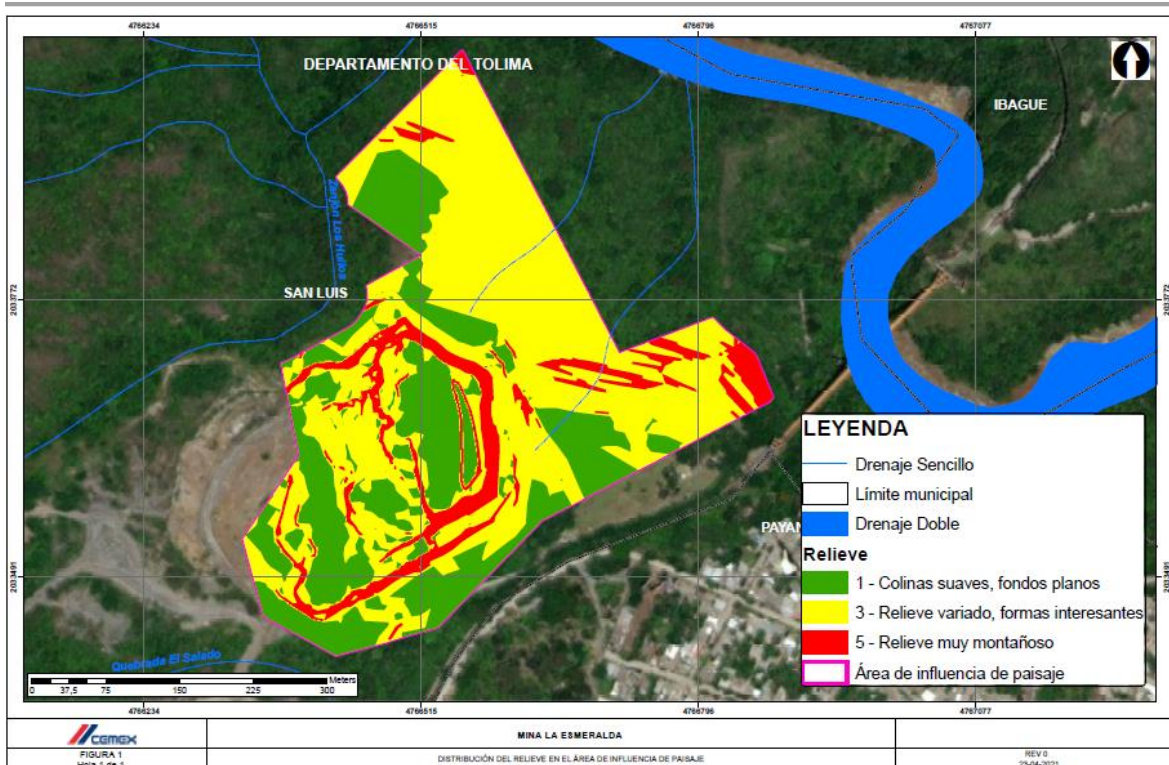


Figura 37. Distribución de la pendiente en el Área de influencia de paisaje

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, el relieve es un factor importante en la identificación del grado de fragilidad visual del paisaje; puesto que paisajes planos aceptan con mayor facilidad modificaciones, contrario a lo que sucede con paisajes inclinados donde las modificaciones se visualizarán con mayor facilidad.

5.1.4.1.2. Elementos físicos del paisaje: cursos o láminas de agua

Teniendo en cuenta la información descrita en el numeral 5.1.6 Hidrología, se describen a continuación las características de hidrológicas del área de influencia.

El sistema hídrico analizado está compuesto principalmente por la cuenca del río Coello y tres afluentes por margen derecha: quebrada Los Huilos, y dos drenajes cuyos nombres no pudieron ser identificados con la información cartográfica disponible por lo que fueron denominados drenaje NN 1 y drenaje NN 2. Además, al sur del área de estudio se identificó el drenaje El Salado, que es tributaria a la quebrada El Cobre.

A continuación, se presenta la descripción de los sistemas lóticos identificados:

- Afluentes al río Coello

El principal sistema hídrico de la zona de estudio corresponde al río Coello, el cual nace en el municipio de Ibagué y confluye al río Magdalena luego de un recorrido de aproximadamente 103 km, su cuenca se desarrolla también en el municipio de Cajamarca, la variación altitudinal de su cuenca es entre 1000 msnm a 700 msnm en la zona de estudio. Con la red de drenaje disponible se identificaron cuatro cauces tributarios por margen derecha: 1.subcuenca del zanjón Los Huilos, la cual nace a la cota 750 msnm y confluye con el río Coello a la cota 600 msnm, 2. subcuenca del drenaje 1

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

la cual nace aproximadamente a la cota 700 msnm y confluye en el río Coello a la cota 570 msnm, finalmente se identificó la subcuenca del drenaje 2 que nace en la cota 720 msnm y tiene su confluencia al río Coello a la cota 570 msnm.

- Afluentes a la quebrada El Cobre

Dentro del área de estudio se identifica la subcuenca del drenaje El Salado, que nace a la cota 800 msnm y confluye a la quebrada El Cobre en la cota 575 msnm, su cuenca se desarrolla en el municipio de San Luis. Finalmente la quebrada El Cobre es tributaria del río La Luisa.

5.1.4.1.3. Elementos bióticos del paisaje: vegetación y fauna (coberturas de la tierra)

En el área de influencia se distribuyen ocho unidades de cobertura de la tierra, de las cuales dos unidades son de tipo natural con algún grado de intervención (bosque ripario y Vegetación secundaria o en transición) que ocupan cerca del 45,27% de la superficie; las unidades restantes se relacionan con superficies completamente intervenidas, donde predominan las áreas artificializadas o degradadas por actividades mineras (43,52%) sobre áreas degradadas con predominancia de pastos (11,22%).

Las coberturas de la tierra son un atributo importante en la valoración del paisaje, puesto que por la variedad de formas y colores son llamativas o no a la vista de los observadores. De acuerdo a lo anterior, las superficies naturales presentan un mayor atractivo en el paisaje, que las superficies antrópicas totalmente intervenidas y que no son agradables a simple vista. En la Tabla 10 se presentan las superficies ocupadas por cada una de las coberturas de la tierra que se distribuyen en el área de influencia; adicionalmente en el Capítulo 5.2 Caracterización biótica se describen en mayor detalle las características de estas coberturas.

Tabla 10. Coberturas naturales y artificiales presentes en el área de influencia.

CLC Nivel 1	CLC Nivel 2	CLC Nivel 3	Área (ha)	Proporción (%)
Territorios Artificializados	Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	Red vial y terrenos asociados	0,3	2,01%
	Zonas de extracción minera y escombreras	Zonas de extracción minera	6,18	41,50%
Territorios Agrícolas	Pastos	Pastos limpios	0,2	1,34%
		Pastos arbolados	0,68	4,57%
		Pastos enmalezados	0,51	3,43%
Bosques y áreas seminaturales	Bosques	Bosque de galería y ripario	1,05	7,05%
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Vegetación secundaria o en transición	5,69	38,21%
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Tierras desnudas y degradadas	0,28	1,88%

CLC Nivel 1	CLC Nivel 2	CLC Nivel 3	Área (ha)	Proporción (%)
Total			14,89	100%

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las coberturas naturales son el hábitat de las especies de fauna, las cuales son atractivas para el observador. Las coberturas naturales, aunque intervenidas, se caracterizan por presentar una variedad de individuos que son llamativos a simple vista; a continuación en la Fotografía 38 se presentan algunas de las especies encontradas en el área de influencia que ofrecen variedad en tonalidades y formas al paisaje y lo hacen más atractivo. En el Capítulo 5.2 Caracterización biótica se describen en mayor detalle las características de la fauna que se distribuye en el área de estudio.



Fotografía 38. Algunas de las especies de fauna registradas para el área de influencia Fuente: Elaboración propia.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.1.4. Elementos antrópicos del paisaje: infraestructura

Los elementos antrópicos del paisaje corresponden a las coberturas de la tierra que han sido modificadas totalmente por el ser humano. Para el área de influencia de paisaje del proyecto, estas se relacionan principalmente con las áreas de extracción mineras, red vial, y tierras desnudas y degradadas ver Fotografía 39.





Fotografía 39. Superficies antrópicas.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2. Unidades del paisaje

Una vez valorados los elementos que componen el paisaje siguiendo la metodología descrita en el Numeral de Paisaje, contenida en el Capítulo 2 Generalidades del presente EIA, se describe a continuación el estado del paisaje en el área de influencia del proyecto.

5.1.4.2.1. Calidad visual

En el área de paisaje, predominan las superficies con un “relieve variado, formas interesantes” las cuales ocupan una superficie de 56,08%, las cuales son superficies que presentan pendientes entre 12 y 50%, seguidas por las pendientes con un valor que oscila entre el 0 y 12%. Por lo general el relieve es inclinado a ligeramente escarpado con algunas colinas aisladas dentro del área de influencia del paisaje. Por lo general, los relieves planos son menos atractivos a la vista que relieves montañosos; por lo tanto, el atractivo del área de influencia corresponde a las zonas montañosas que se presentan en formas variadas, las cuales se combinan con colinas suaves para dar transiciones y contrastes que mejoran la calidad visual.



Fotografía 40. Vista general de relieve en el área de influencia.
Fuente: Elaboración propia.

La vegetación natural en el área de influencia es escasa, predominando principalmente zonas artificializadas, lo que hace de la vegetación natural un atractivo y a la vez un elemento con una rareza notoria ver Tabla 11. Por lo general en el área de estudio desde la percepción del color, la vegetación y la rareza, se podría decir que la calidad visual es media, destacándose así los elementos que proveen una alta variedad en tonos y formas como el bosque de galería, la vegetación secundaria y en una menor medida los árboles presentes en las coberturas naturales antrópicas y asociados a las cercas vivas que delimitan los predios.



Fotografía 41. Vegetación del área de influencia.
Elaboración propia.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

En la Fotografía 41, se presentan algunos de los elementos que componen el paisaje en el área de influencia, los cuales en conjunto provocan una variedad en formas y tonos como se observa en la fotografía general del área de estudio.

En relación con los cuerpos de agua, en el área de influencia se destaca la presencia de los afluentes del río Coello y los afluentes de la quebrada El Cobre. Los cuerpos de agua son agradables a la vista y son un atractivo escénico en la medida en que a su alrededor, además del espejo de agua, se emplaza vegetación arbórea y arbustiva que agrega valor al paisaje. En la Tabla 11 se presentan los contrastes provocados por estos cuerpos de agua incluyendo el área de ronda y en la Fotografía 42 se presenta uno de los cuerpos de agua relacionados al área de influencia biótica (Zanjón Los Huilos).



Fotografía 42. Cuerpos de agua en el área de influencia.

Fuente: Elaboración propia.

Las modificaciones antrópicas en el área de influencia como se ha mencionado desde un inicio, corresponden a las actividades asociadas a actividades extractivas, de ahí la predominancia de superficies artificializadas que se evidencian en la Tabla 10. Sin embargo, existen mosaicos que presentan en su interior relictos de vegetación, que aunque pequeños, presentan variedad en forma y color, por lo que para el presente estudio agrega valor al paisaje. De acuerdo a lo anterior, en el área de influencia del paisaje existen superficies con elementos que agregan valor al paisaje ocupando cerca del 11,22%. Ver Tabla 11.



Fotografía 43. Modificaciones antrópicas.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se puede observar las categorías utilizadas para la calidad visual y su distribución en el área de influencia de paisaje. Ver la Tabla 11.

Tabla 11. Superficie ocupada por cada uno de los elementos del paisaje para estimar la calidad visual.

Elemento	Valoración	Área (ha)	Proporción (%)
Relieve	Colinas suaves, fondos planos	4,82	32%
	Relieve variado, formas interesantes	8,35	56%
	Relieve muy montañoso	1,72	12%
Subtotal		14,89	100%
Vegetación	Poca o ninguna variedad	12,45	84%
	Alguna variedad en la vegetación	1,39	9%
	Gran variedad de tipos de textura	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Agua (cuerpos de agua)	Ausentes o presentes pero imperceptibles	13,01	87%
	Cuerpos de agua presentes que se destacan poco en el paisaje	1,88	13%
	Ecosistemas lóticos que se destacan en el paisaje	0	0%
Subtotal		14,89	100%
Color	Bastante común	12,45	84%
	Característico aunque similar a otros en la región	1,39	9%
	Combinaciones de color	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Rareza	Bastante común	12,45	84%
	Distintivo aunque algo similar	1,39	9%

Elemento	Valoración	Área (ha)	Proporción (%)
	Único en su clase; memorable	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Modificación antrópicas	Muy discordantes	6,76	45%
	Añaden poca variedad visual a la zona	7,08	48%
	Agregan variabilidad visual y armonía	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Influencia de paisajes adyacentes	El P. ady. no tiene influencia en la calidad	1,82	12%
	El P. ady. mejora moderadamente	6,68	45%
	El P. adya. mejora la calidad visual	6,39	43%
Subtotal		14,89	100%

Fuente: Elaboración propia.

Una vez fueron valorados cada uno de los atributos del paisaje, se identifica que para el área de influencia predominan las superficies con una calidad visual baja las cuales cubren cerca del 79,18% de la superficie total, seguidas por las superficies con calidad visual alta que ocupan el 13,70%. Como se evidencia en la Figura 37, no existe presencia significativa de elementos que aumenten la calidad visual del área de estudio, a excepción de la vegetación que rodea los cuerpos de agua.

Lo anterior indica que a nivel de calidad visual del paisaje, el desarrollo del proyecto presentará modificaciones al medio causando una reducción en la calidad visual, principalmente en superficies con una calidad visual alta, las cuales pasarán a tener una calidad visual baja (aproximadamente 1,05 ha), por la presencia del área de mina.. En el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-PSJE-001, se presenta la distribución de la calidad visual del paisaje y la ubicación de cada uno de los elementos que componen el proyecto.

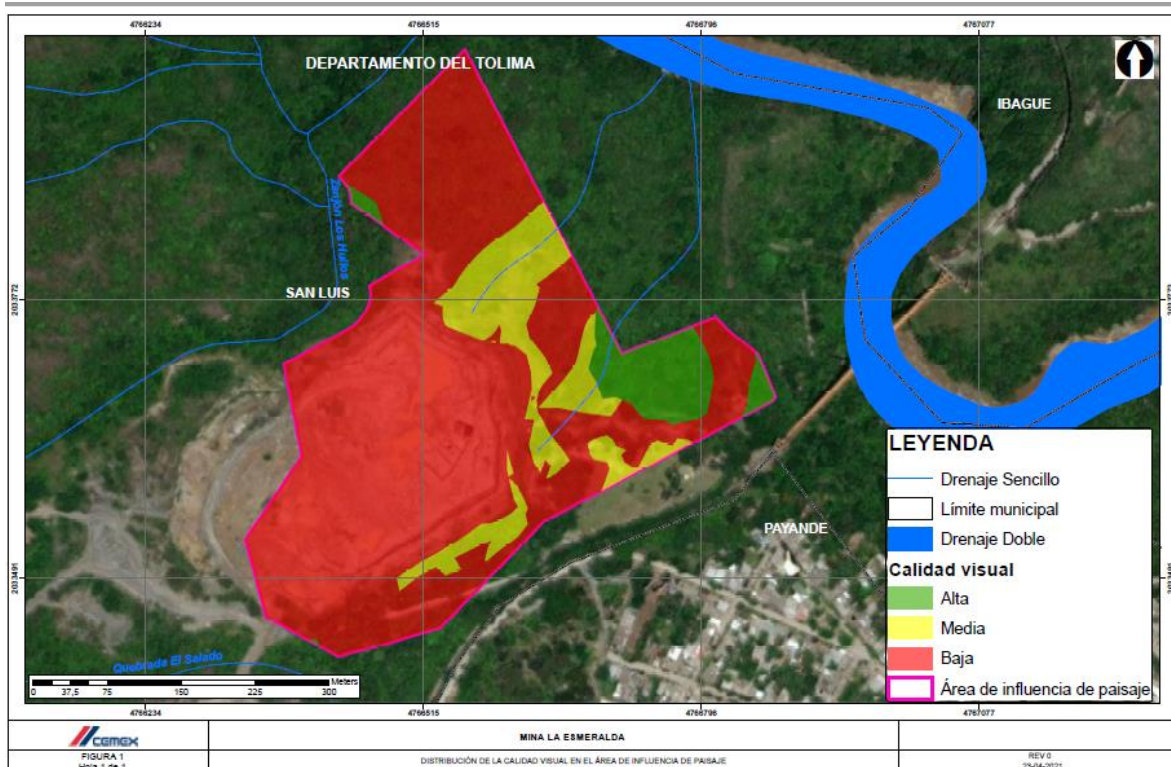


Figura 38. Distribución de la calidad visual en el área de influencia.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2.2. Fragilidad visual

La fragilidad visual se define como la capacidad del paisaje de aceptar las modificaciones que sobre este se realicen y así continuar siendo agradable para los observadores. El elemento determinante para este análisis corresponde al relieve, puesto que las modificaciones a las geofomas no son fácilmente aceptadas en el paisaje; sin embargo, en superficies planas el paisaje tiende a asimilar las modificaciones al medio provocando que los observadores no identifiquen con facilidad dichas actuaciones.

Para el área de influencia predominan superficies con relieves inclinados de pendientes mayores al 12% (68% de la superficie analizada), dominadas con elementos artificiales y arbóreos dispersos que presentan diversidad estructural baja y un bajo potencial de regeneración natural, lo que permite inferir que la capacidad de absorción visual del paisaje es baja, ya que se presentan significativas modificaciones al paisaje. En la Tabla 12 se presenta la valoración de los elementos analizados para estimar la fragilidad visual del paisaje.

Las unidades naturales de vegetación se destacan en poca medida y ocupan tan solo el 45,27% de la superficie total del área de estudio, es posible que sobre estas zonas sea donde se identifique una mayor capacidad de absorción visual, relacionada con la variedad en formas, colores y elementos arbóreos que reducen la visibilidad de los observadores y facilitan la absorción de las modificaciones que se realicen al paisaje.

Tabla 12. Superficie ocupada por cada uno de los elementos del paisaje para estimar la fragilidad visual.

Factor	Características	Superficie (ha)	Proporción (%)
Relieve (S)	Escarpado (superior a 50% de pendiente)	1,72	12%
	Moderadamente escarpado (12 %-50% de pendiente)	8,35	56%
	Relativamente plano (0-12 % de pendiente)	4,82	32%
Subtotal		14,89	100%
Diversidad estructural de la vegetación	Baja (superficies sin vegetación, pastos y malezas)	12,45	84%
	Media (plantaciones forestales, cultivos y mosaicos)	1,39	9%
	Diversificada (bosques, incluye vegetación secundaria y elementos con coberturas naturales que presenten grados de alteración limitados)	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Estabilidad del suelo y erosionabilidad	Restricción alta derivada de riesgos altos de erosión e inestabilidad y baja regeneración	0,72	5%
	Restricción moderada debido a riesgos de erosión e inestabilidad y baja regeneración	3,6	24%

Factor	Características	Superficie (ha)	Proporción (%)
	Poca restricción por riesgos bajos de erosión e inestabilidad y buen potencial de regeneración	10,57	71%
Subtotal		14,89	100%
Contraste suelo-vegetación (V)	Alto contraste visual entre suelos expuestos y la vegetación adyacente	12,15	82%
	Bajo contraste visual entre los suelos expuestos y la vegetación adyacente	2,74	18%
Subtotal		14,89	100%
Potencial de regeneración en la vegetación	Bajo potencial	12,45	84%
	Regeneración moderada o potencial de regeneración	1,39	9%
	Alta regeneración	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Contraste de color entre vegetación y rocas	Alto contraste	5,69	38%
	Bajo contraste	9,2	62%
Subtotal		14,89	100%

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la ponderación de cada una de los elementos y estimada la capacidad de absorción visual para el área de influencia se evidencia que en su mayoría predominan las superficies con una fragilidad visual alta y baja capacidad de absorción visual (67,02%), producto de relieves inclinados y la dominancia de coberturas antrópicas que no reducen la armonía del medio ver Figura 38 y plano CAP05.1-CMAB-LAES745-PSJE-002.

El Proyecto se ubicará sobre superficies con fragilidad visual alta en su mayoría (cerca de 9,98 ha); sin embargo parte se ubicará sobre superficies con una fragilidad visual moderada (cerca de 4,86 ha). Esto indica que el paisaje por sus características es capaz de asimilar las modificaciones que se realicen al medio, no obstante debido a la cercanía con centros poblados, este será perceptible por los observadores, por lo que se realizarán actividades de manejo que mitiguen el cambio en la calidad visual.

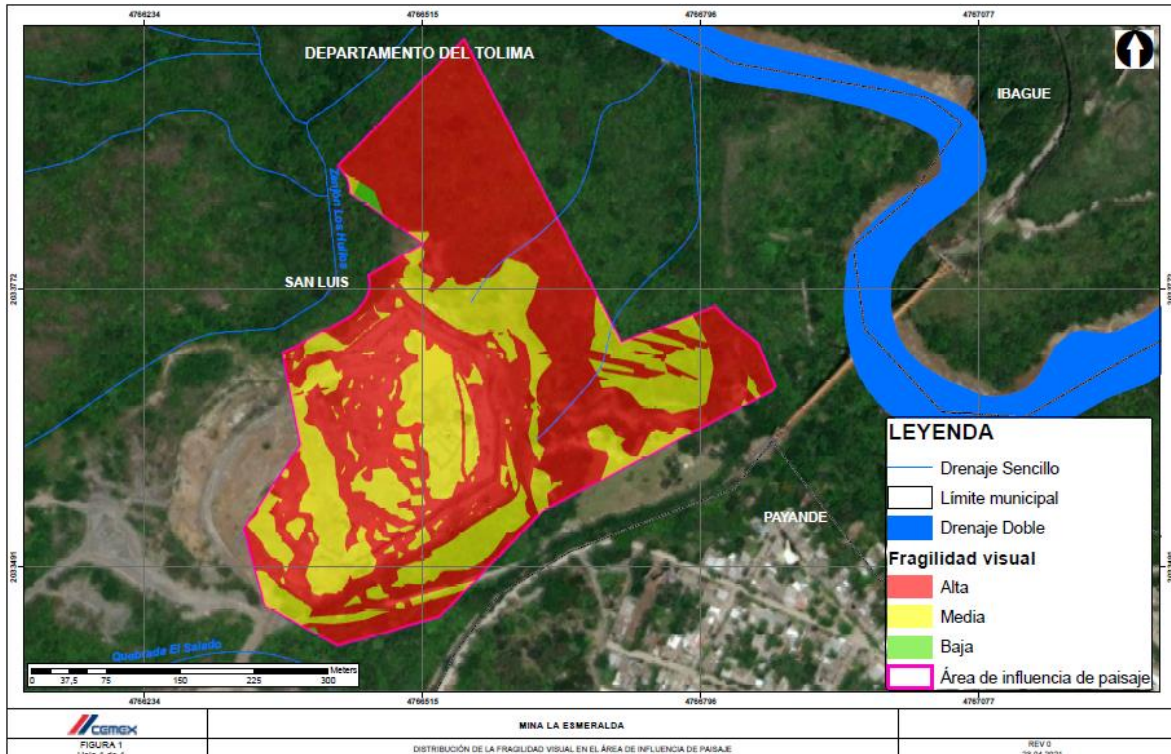


Figura 39. Distribución de la fragilidad visual en el área de influencia.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2.3. Belleza paisajística

El atractivo escénico del paisaje se encuentra relacionado con la atención que causa cuando es divisada por los observadores. En el paisaje son mucho más atractivas las superficies donde se presenta una variabilidad en tonos, formas y tamaños y las cuales son agradables a la vista, así los pastos aunque son atractivos, no tienen un grado de interés tan alto como si lo tienen las superficies naturales, que además transmiten sentido de calma.

De acuerdo con la distribución de las coberturas de la tierra en el área de influencia, se identifica que predominan las zonas con atractivo escénico deteriorado, ocupando cerca del 82% de la superficie total, mientras que se presentan de forma escasa en el paisaje elementos con un atractivo escénico singular, ya que ocupan tan solo el 7% de la superficie total del área de influencia. Ver Tabla 13.

La dominancia de superficies con un atractivo escénico deteriorado y la gran presencia de elementos discordantes, hacen del paisaje del área de influencia un lugar poco armónico, en la que los elementos discordantes se relacionan con la red vial y donde las zonas de extracción minera son elementos comunes ver Tabla 13. Durante la ejecución del proyecto, estas superficies aumentarán a causa del establecimiento de áreas de mina, reduciendo la presencia de elementos comunes y provocando el establecimiento de elementos con atractivo poco agradable (los cuales se clasifican en la categoría de atractivo escénico deteriorado) que en últimas provocan el desarrollo de una discordancia en el medio.

Por las características del paisaje, como es de esperar predominan las superficies con una correspondencia cromática baja las cuales ocupan el 82% (Tabla 13). Así mismo la presencia de elementos con una integridad escénica muy baja

(altamente alterada) es común en el paisaje, mientras que los elementos naturales que se relacionan con superficies con una integridad alta ocupan tan solo el 7% de la superficie.

Por último, con relación a la escala visual y el nivel de interés, se identifica que en el área de influencia del paisaje predominan las superficies con una vista en el primer plano con interés bajo, ocupando un 43%, seguidas por las superficies con una vista inmediata y un interés bajo con un 38% de la superficie total. Por las características del relieve y la presencia de pocos observadores es común la observación solamente de los planos inmediatos y primeros planos ver Tabla 13.

Tabla 13. Superficie ocupada por cada uno de los elementos del paisaje para estimar la belleza paisajística.

Elemento	Valoración	Superficie (ha)	Proporción (%)
Atractivo escénico	Deteriorado	12,15	82%
	Común o típico	1,69	11%
	Singular	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Elementos Discordantes	Alto (> 3 elementos)	12,17	82%
	Medio (2 elementos)	0,28	2%
	Bajo (un elemento)	1,39	9%
	Nulo (no hay elementos discordantes)	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Correspondencia cromática	Bajo (Baja correspondencia cromática)	12,17	82%
	Media	0,28	2%
	Alto (alta correspondencia cromática)	1,39	9%
	Nulo	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%
Integridad Escénica	Muy baja (muy alterado)	12,45	84%
	Baja (moderadamente alterada)	1,39	9%

Elemento	Valoración	Superficie (ha)	Proporción (%)
	Moderada (Levemente alterado)	0	0%
	Alta (parece inalterado)	1,05	7%
	Muy alta (inalterado)	0	0%
Subtotal		14,89	100%
Escala visual	Plano inmediato (0 - 100 m)	0,23	2%
	Primer plano (100 - 800 m)	14,66	98%
	Plano medio (800 - 6000 m)	0	0%
	Plano lejano (> 6000 m)	0	0%
Subtotal		14,89	100%
Nivel de Interés	Vista inmediata con interés bajo	5,69	38%
	Vista en primer plano con interés bajo	6,45	43%
	Vista inmediata con interés medio	0,08	1%
	Vista en primer plano con interés medio	1,62	11%
	Vista en primer plano con interés alto	1,05	7%
Subtotal		14,89	100%

Fuente: Elaboración propia.

Una vez ponderados cada uno de los atributos empleados para estimar la belleza paisajística, se identifica que en el área de influencia se destacan las superficies con una belleza paisajística baja (83,61%) relacionadas con la alta modificación que se ha realizado a las coberturas naturales provocando la reducción de ecosistemas (Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-PSJE-003), la pérdida de hábitats y en consecuencia la pérdida de elementos que conjugan un paisaje armónico y sobre los que el color, la variación de las formas y los tamaños hacen de este un elemento característico. Las superficies con una belleza paisajística alta, se relacionan con los ecosistemas naturales como el bosque ripario y la vegetación secundaria ocupando cerca del 7,05% de la superficie. Ver Figura 39.

Con el desarrollo del proyecto se intervendrán superficies con un índice de belleza paisajística principalmente baja (Figura 39), las cuales por la presencia de elementos discordante relacionados con la mina se mantendrán en un índice de belleza paisajística bajo, por lo anterior los manejos deberán estar encaminados a reducir la alteración en la calidad visual y el índice de belleza paisajística.

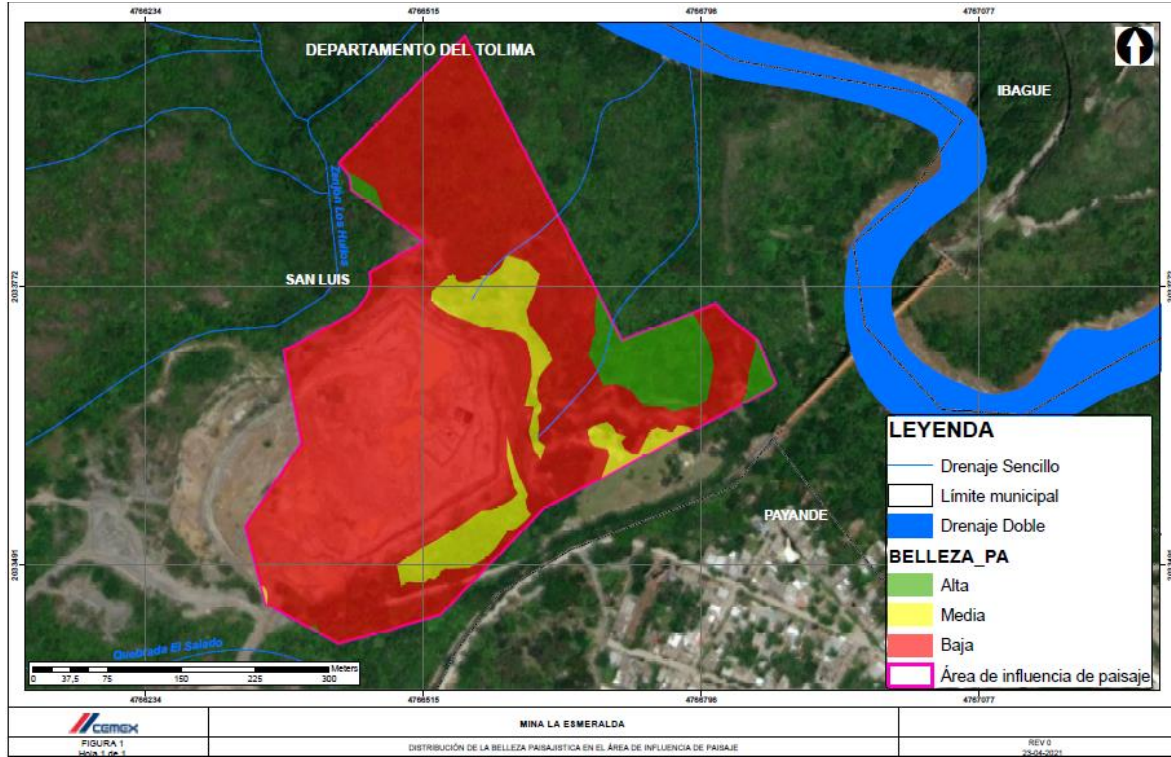


Figura 40. Distribución del índice de belleza paisajística.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2.4. Unidades de paisaje

A partir de la zonificación obtenida de la valoración de la calidad visual y la fragilidad visual, se procedió a identificar las unidades del paisaje.

Dadas las características del paisaje, no se identifica la presencia de la unidad **Bbj** (Calidad visual baja y fragilidad visual baja) y **Mal** (Calidad visual media y fragilidad visual alta), si destacan las superficies con una calidad visual baja y una fragilidad visual alta (**Bal**), las cuales se caracterizan por elementos con un relieve inclinado y sobre el que predominan superficies antrópicas que en alguna medida desarmonizan el paisaje ocupando cerca del 58,63%, le siguen las superficies con una calidad visual baja y una fragilidad media con un 20,55% de la superficie total (Tabla 14).

Tabla 14. Superficie ocupada por cada una de las unidades de paisaje presentes en el Área de Influencia.

Unidad de paisaje	Descripción	Área (ha)	Proporción (%)
Aal	Calidad visual alta y fragilidad visual alta	0,27	1,81%

Unidad de paisaje	Descripción	Área (ha)	Proporción (%)
Amd	Calidad visual alta y fragilidad visual media	0,74	4,97%
Abj	Calidad visual alta y fragilidad visual baja	0,05	0,34%
Mmd	Calidad visual media y fragilidad visual media	1,06	7,12%
Mbj	Calidad visual media y fragilidad visual baja	0,98	6,58%
Bal	Calidad visual baja y fragilidad visual alta	8,73	58,63%
Bmd	Calidad visual baja y fragilidad visual media	3,06	20,55%
Total		14,89	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 40 y plano CAP05.1-CMAB-LAES745-PSJE-004 se presenta la distribución de las unidades para el área de influencia de paisaje.

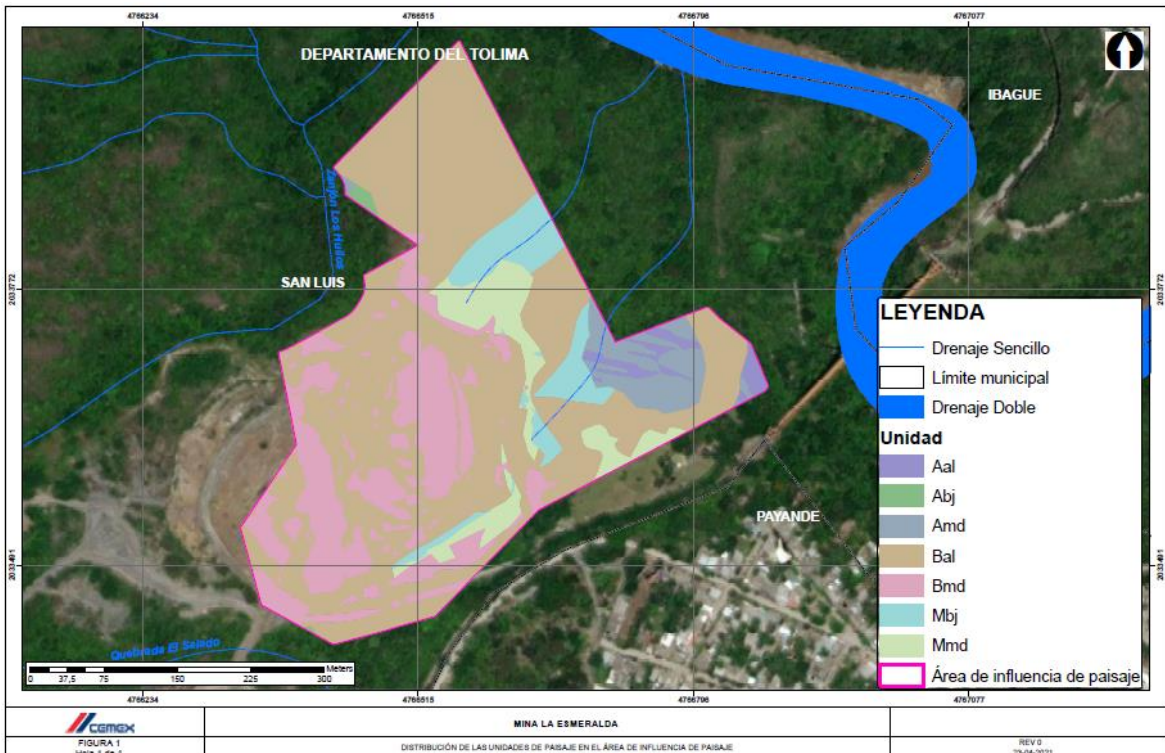


Figura 41. Distribución de las unidades de paisaje en el área de influencia.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.3. Visibilidad del paisaje

Los observadores definidos para evaluar la escala visual y la visibilidad de las unidades de paisaje que se distribuyeron en el área de influencia paisaje sobre la vía y las unidades habitacionales; con esta información se realizó el análisis identificándose que el 59,64% de las superficies se pueden observar a simple vista desde los puntos de observación, efecto que se encuentra relacionado con el tipo de relieve del área de estudio y la ubicación de los observadores. Ver Tabla 15 y Figura 41.

Se debe aclarar adicionalmente, que existirán barreras naturales que no permitirán ver por completo las unidades de paisaje, como es el caso de la vegetación (cercas vivas) que se distribuyen a lo largo del área de estudio y la escala visual de los observadores. Lo anterior indica que para algunos observadores se dificultará la observación de las modificaciones al paisaje, principalmente para aquellos que se ubican lejos del área de intervención. En la Tabla 15 se presenta la superficie ocupada por cada unidad teniendo en cuenta la visibilidad y los planos de observación (Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-PSJE-005).

Tabla 15. Visibilidad de las unidades en el área de influencia.

Visibilidad	Unidad	Descripción	Escala visual			Área (ha)	Proporción (%)
			Plano inmediato	Primer plano	Plano medio		
Visible	Aal	Calidad visual alta y fragilidad visual alta		0,27		0,27	1,81
	Amd	Calidad visual alta y fragilidad visual media		0,74		0,74	4,97
	Abj	Calidad visual alta y fragilidad visual baja		0,05		0,05	0,34
	Mbj	Calidad visual media y fragilidad visual baja		0,92		0,92	6,18
	Mmd	Calidad visual media y fragilidad visual media	0,07	0,78		0,85	5,71
	Bal	Calidad visual baja y fragilidad visual alta	0,15	5,15		5,3	35,59
	Bmd	Calidad visual baja y fragilidad visual media	0,01	0,74		0,75	5,04
No Visible	Mbj	Calidad visual media y fragilidad visual baja		0,06		0,06	0,40
	Mmd	Calidad visual media y fragilidad visual media		0,21		0,21	1,41
	Bal	Calidad visual baja y fragilidad visual alta		3,42		3,42	22,97
	Bmd	Calidad visual baja y fragilidad visual		2,32		2,32	15,58

		media				
--	--	-------	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

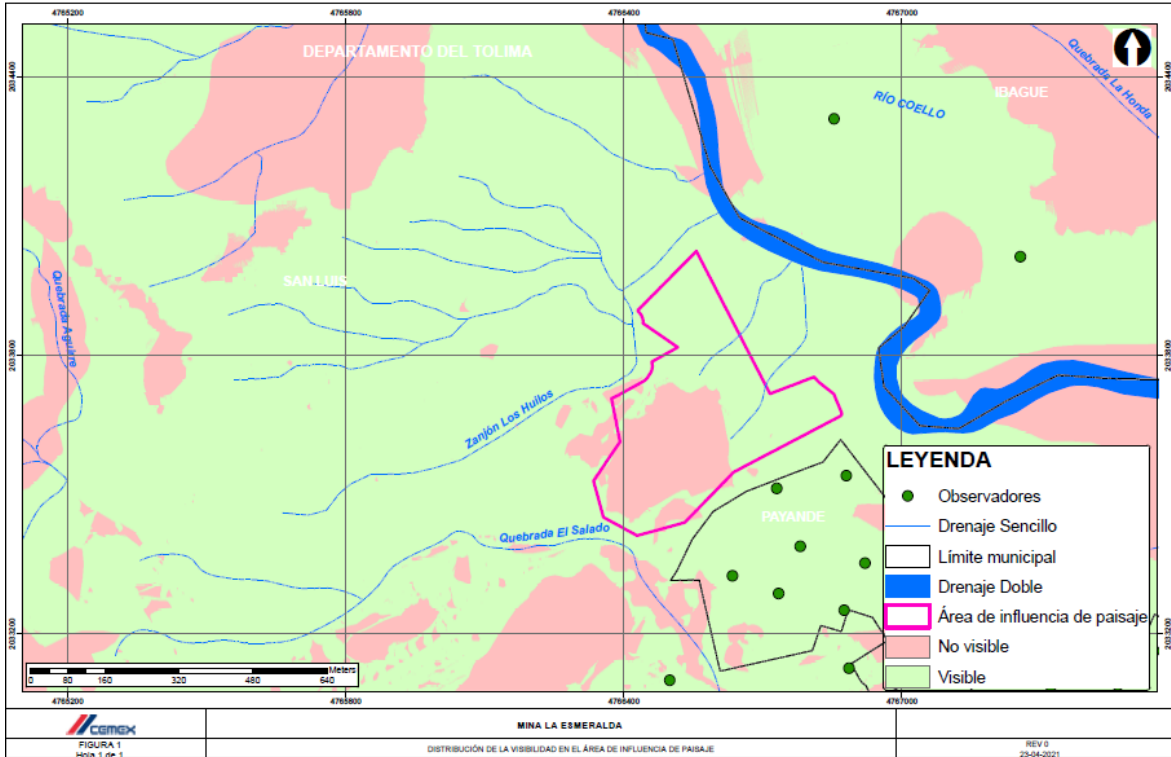


Figura 42. Visibilidad del paisaje en el área de influencia.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.4. Tamaño de la discordancia

Como se mencionó en los numerales anteriores, los elementos discordantes que se distingue en el área de influencia de paisaje corresponde a la red vial y ferroviaria y zonas de extracción minera, por lo que a la presencia de elementos discordantes con un tamaño de discordancia alta se encuentran asociadas a la unidad **Bmd**; las demás unidades no presentan elementos discordantes por lo que el tamaño de la discordancia es nulo como se puede observar en la Tabla 16 o presentan valores medios como es el caso de la unidad **Bal**. Se estima que con la ejecución del proyecto aumente poco el tamaño de la discordancia en las superficies donde se emplaza el proyecto, aunque igualmente se deben desarrollar planes de manejo que mitiguen este tipo de modificaciones que se realizarán al paisaje.

Tabla 16. Tamaño de la discordancia por unidad de paisaje para el área de influencia.

Unidad de paisaje	Superficie Elementos discordantes(ha)	Proporción (%)	Valoración del Tamaño de la Discordancia	Tamaño de la unidad (ha)
Aal	0	0%	Nulo	0,27
Amd	0	0%	Nulo	0,74

Unidad de paisaje	Superficie Elementos discordantes(ha)	Proporción (%)	Valoración del Tamaño de la Discordancia	Tamaño de la unidad (ha)
Abj	0	0%	Nulo	0,05
Mmd	0	0%	Nulo	1,06
Mbj	0	0%	Nulo	0,98
Bal	3,75	43%	Medio	8,73
Bmd	2,75	90%	Alta	3,06

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.5. Sitios de interés paisajístico

Basados en los momentos de participación, las fichas veredales y el Capítulo 5.3. Medio Socioeconómico, se puede indicar que en el área de influencia de paisaje no existen sitios de interés paisajístico. Esto debido a que estas son zonas que presentan un historial de actividades mineras y por lo tanto, no presentan alta afluencia de público por las consideraciones mencionadas anteriormente, ya que se presenta una baja apreciación e interés por habitantes del municipio.

El municipio de San Luis cuenta con diversos escenarios naturales aledaños como lo son las Cascadas de Chicalá o Payandé, que son sitios para la recreación para los pobladores de Ibagué, Gualanday y las localidades cercanas, extendiendo su influencia a otros lugares del país, e incluso iniciándose su reconocimiento a nivel internacional. Estas cascadas no son influenciadas por el área de proyecto ni por el área de influencia del componente de paisaje.

En cuanto a áreas protegidas y/o ecosistemas estratégicos, dentro del área de influencia de paisaje no se encuentran áreas destinadas a la conservación de la biodiversidad como Quimbayito, Consorte y La favorita, Ejido Laguna Río Viejo, Cerros de occidente, relictos de bosque secundario, cuchilla de Guacimal, Cordillera de la laguna, Guacimito, los cerros de Buenos Aires, Chicalá, Chipi, La Jagua y San Pedro, que se ubican en el municipio de San Luis.

5.1.4.6. Percepción de las comunidades como referente de su entorno físico en términos culturales

En términos socio culturales se hizo la correspondiente indagación sobre la percepción del paisaje de los habitantes de las veredas del área de influencia de paisaje del proyecto (Payande) a través de algunas preguntas incluidas en la ficha de reconocimiento predial y en la ficha veredal. En términos generales, los entrevistados no identificaron ningún otro sitio de interés paisajístico particular, valorado con relevancia desde el punto de vista cultural, aunque sí es importante detallar que los habitantes consideran las geoformas como las principales características para determinar un paisaje agradable y donde identifican como principal amenaza las construcciones y la deforestación.

Al constituirse el área del proyecto en una zona relativamente homogénea (minería tanto formal como artesanal), con uso principalmente en actividades de extracción, no existen elementos naturales a los cuales los habitantes hayan conferido (desde el punto de vista perceptual) especial significado y valor cultural.

En este sentido el entorno paisajístico, desde el punto de vista cultural, ya se encuentra establecido y con una evolución conforme su población se va diversificando, constituyéndose en una construcción social, colectiva y culturalmente diversa. Esta característica explica porque al indagar a los pobladores a través de la ficha veredal y la ficha de reconocimiento predial acerca de “qué es lo que más de les gusta ta de vivir en su unidad territorial” o si “existen áreas de atracción paisajística” o “áreas especial de uso ambiental, recreativo o turístico dentro del predio” o “sitios sagrados”, se indique

las geoformas como una generalidad y se incluya las cascadas de Chicalá o Payandé como la principal observación sobre este tema.

5.1.4.7. Descripción del proyecto dentro del componente paisajístico de la zona.

El área de influencia de paisaje presenta un desarrollo histórico de economías tanto informales como formales que se dedican a la explotación de recursos naturales (minerales), por lo tanto y como se indica en las unidades de paisaje, se encuentran zonas de baja calidad visual y alta fragilidad asociadas a actividades mineras que implican una actual tendencia hacia la conformación de unidades de bajo interés por los habitantes de la zonas.

Adicionalmente, es importante tener en cuenta que los paisajes de este tipo se encaminan hacia la asimilación de las comunidades debido a la construcción social que se ha desarrollado por parte de los habitantes del territorio entorno a estas actividades productivas.

Por lo tanto, aunque se considera una posible modificación de las unidades de paisaje. Estas se encuentran ya dentro de una tendencia que permite su asimilación no solamente por parte del paisaje (discordancias actuales) sino también por parte de los pobladores que presentan una convivencia de décadas con estos tipos de usos del suelo.

5.1.5. Suelos y Uso de la tierra.

El suelo, es un cuerpo natural que comprende sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurren en la superficie de la tierra, que ocupa un espacio, y que se caracteriza por horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia, o por la habilidad de soportar plantas enraizadas en un ambiente natural (USDA - NRCS, 2014). El estudio del suelo se basa en la comprensión de la naturaleza, las propiedades, dinámicas y funciones del suelo como parte del paisaje y los ecosistemas; inicia con la disponibilidad de información confiable sobre la morfología de los suelos y otras características obtenidas a través del estudio y la descripción del suelo en el campo (FAO, 2009).

Los ambientes edafogenéticos son áreas en las que coinciden la posición geomorfológica (paisaje y tipo de relieve), la litología o la naturaleza de los sedimentos (material de origen) y el clima ambiental. Por lo tanto, las poblaciones de suelos que allí ocurren presentan un grado relativo de similitud, lo que facilita la interpretación, tanto de su capacidad de uso y manejo como de su vulnerabilidad ante la acción de los factores ambientales y la actividad del hombre. Por consiguiente, su identificación y análisis es muy útil, en el caso del presente EIA, para prever los impactos del proyecto sobre el área de influencia del componente edafológico y para conocer las limitaciones del medio edáfico para el desarrollo de las obras proyectadas y para evaluar el estado actual de la erosión, la posible salinización, la desertificación y remoción como recomiendan los protocolos que han publicado el IDEAM y el IGAC.

La delimitación y caracterización de los suelos es un proceso donde se determinan los factores y procesos de su formación, referidos al material parental, los cambios en el relieve, las variaciones climáticas y la erosión; en aras de conocer aspectos importantes de la física de suelos, como son: el régimen de agua, aire y temperatura, los procesos de floculación y dispersión de los coloides del suelo, la retención y el movimiento de agua, la formación de la estructura y la distribución del espacio poroso, y con el fin de separar en unidades de suelo con características homogéneas. El conocimiento y la descripción de las características del suelo son fundamentales para llevar a cabo el Ordenamiento Territorial de los recursos naturales en el país; A partir de estas, se desarrollan diversas técnicas de caracterización que permiten conocer las condiciones del suelo, importantes para el crecimiento de las plantas, la sostenibilidad del mismo y las actividades asociadas al manejo de suelos agropecuarios o conservacionistas para determinada área de estudio (Valenzuela, & Torrente, 2010, 594).

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Para el presente documento, la delimitación y caracterización permite conocer las características de los suelos y del entorno, basados en las observaciones realizadas directamente en campo, y tomando como referencia el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Tolima (IGAC, 2004). La descripción de suelos se hace de acuerdo con los tipos de relieve presentes en los paisajes de Montaña y Piedemonte, los que se caracterizan por tener condiciones similares en cuanto a clima, topografía y materiales parentales. La potencialidad de los suelos se determina en función de la capacidad de uso de las tierras; para el establecimiento de un uso adecuado a través de las limitaciones pedogenéticas observadas en campo se hace una agrupación de las unidades cartográficas de suelo según su uso y manejo, ubicándose en clases y subclases, definido por el Sistema de Clasificación Taxonómico Internacional.

5.1.5.1. Unidades de suelos.

De acuerdo con lo establecido en la Metodología del presente Estudio de Impacto Ambiental y La Metodología general para la elaboración y presentación de Estudios Ambientales (MADS - ANLA, 2018), se deben adoptar los parámetros establecidos por los diferentes institutos y entidades oficiales que tienen por función la generación, administración y análisis de información que, para el caso del recurso edáfico, se basa principalmente en la utilización de la metodología ofrecida y definida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2014), que ha sido formulada siguiendo el Sistema Taxonómico Americano (Soils Taxonomy, 1990), actualizado a 2014 (USDA - NRCS, 2014), también se ha tenido en cuenta los protocolos de monitoreo y seguimiento referente a erosión y remoción (MADS - IDEAM - UDCA 2015), salinización (IDEAM - CAR - UDCA 2017) y desertificación (IGAC - IDEAM 2010).

De igual forma y como fuente de consulta para la caracterización de los suelos en el presente documento, se tiene en cuenta el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Tolima (IGAC, 2004) para determinar la relación suelo-paisaje con los elementos ambientales que participan en esta relación. De tal forma que la descripción de suelos se realiza de acuerdo con los tipos de relieve presentes en cada paisaje, y que se caracterizan por tener condiciones similares en cuanto a clima, topografía y materiales parentales. La caracterización se complementa además con la descripción de perfiles del suelo, pruebas de infiltración y toma de muestras de suelos con sus respectivos análisis de laboratorio, como se describe más adelante en el documento. La revisión de información secundaria permite tener una visión general del nivel de detalle en la información regional generada por las instituciones en los temas de interés para el proyecto, como es el caso de los componentes: suelos, geomorfología, aptitud y uso de los suelos, así como del manejo técnico propuesto para el recurso.

La determinación de los puntos de monitoreo de suelos, se realizó teniendo en cuenta las unidades de suelos que de acuerdo con los requerimientos propios del proyecto, podrían ser susceptibles de intervención. En la Tabla 17, en la Figura 42 y plano CAP05.1-CMAB-LAES745-SUEL-001, se presentan los cuatro puntos de monitoreo de suelos (P), donde se realizó la descripción de perfiles, las respectivas pruebas de infiltración y la toma de muestras para análisis fisicoquímicos en laboratorio, todos con sus respectivas coordenadas, incluyendo las correspondientes unidades cartográficas geomorfológicas determinadas para el área de influencia del componente edafológico. En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.009 se presenta los resultados de caracterización fisicoquímica.

Tabla 17. Coordenadas Puntos de Descripción y Monitoreo de Suelos

Identificación del punto	Coordenadas Este	Coordenadas Norte	Fecha de monitoreo
P1	4766606,829	2033749,406	17/11/2020
P2	4766524,479	2033484,597	17/11/2020
P3	4766893,621	2033660,026	18/11/2020
P4	4766018,643	2033499,307	18/11/2020

Fuente: Elaboración Propia

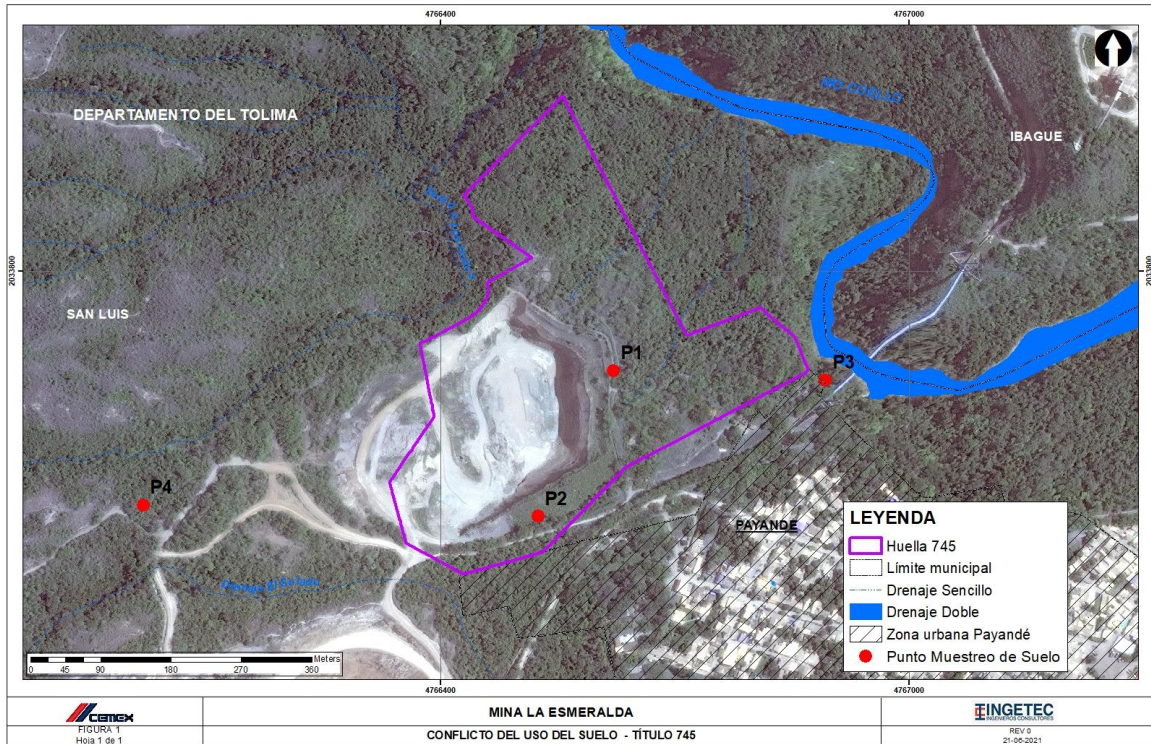


Figura 43. Puntos de monitoreo de suelos
Fuente: Elaboración Propia

5.1.5.2. Unidades geomorfológicas

El objetivo de la identificación de las unidades geomorfológica es lograr que a partir de información concisa y sistemática sobre las formas, los procesos de formación y los procesos naturales referentes al terreno, relacionar tanto la expresión geomorfológica como las condiciones ambientales dominantes, como suelos, hidrología y vegetación, entre otros, ya que estos generan una dinámica de procesos que permite la configuración de diferentes paisajes y tipos de relieve, los cuales conforman el modelado terrestre.

Considerando lo anterior y para los propósitos del presente estudio, la clasificación de unidades geomorfológicas se realiza teniendo en cuenta lo propuesto en el libro “Geopedología, elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales” de Alfred Zinck (Zinck, 2012), las unidades geomorfológicas (paisajes y tipos de relieve) se presenta a continuación. Ver Tabla 18.

Tabla 18. Unidades Geomorfológicas identificadas en el área de Influencia del componente geosférico

Paisajes	
M	Montaña
P	Piedemonte

Tipos de relieve	
lo	Lomas
ca	Cañón
ab	Abanicos
Materiales parentales	
T	Tobas
A	Arcillolitas y areniscas
E	Esquistos y arenas volcánicas

Fuente: Elaboración Propia

5.1.5.3. Unidades cartográficas de suelos

La descripción de suelos, se presenta en la Tabla 19, en la Figura 43 y en el plano CAP05.1-CMAB-LAES745-SUEL-002; desde el punto de vista geomorfológico los suelos se enmarcan en dos paisajes, el paisaje de Montaña (M), con los tipos de relieve de Lomas (lo) y Cañón (ca) y el paisaje de Piedemonte (P) con el tipo de relieve de Abanico; todas las unidades de suelos estudiadas se encuentran distribuidas en el climática Cálido seco.

Tabla 19. Leyenda de suelos en el área de estudio

Clima	Paisaje	Tipo de relieve	Material parental	Unidad cartográfica y componentes	Símbolo	Perfil	Área	%
Cálido seco	Montaña	Lomas	Arcillolitas y areniscas	Consociación Ustic Haplustepts (75%)	MWC	Perfil 4	6,46	43,44
		Cañón	Esquistos y arenas volcánicas	Consociación Typic Ustorthents (75%)	MWD	Perfil 3	0,001	0,005
	Piedemonte	Abanico	Tobas	Asociación Typic Ustorthents (60%) Typic Haplustalfs (40%)	PWH	Perfil 2 Perfil 1	2,77	18,65
	Zonas de minería, sin suelo.					ZM		5,64

Fuente: Elaboración Propia

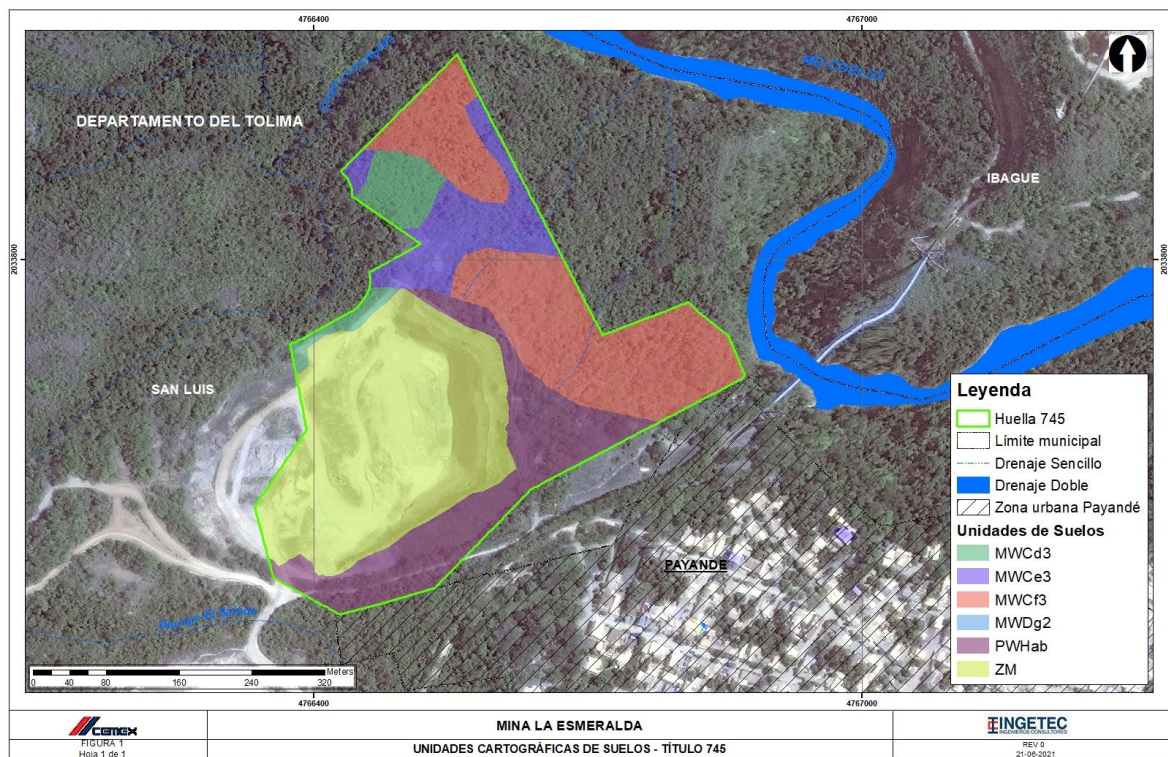


Figura 44. Mapa de suelos del área de influencia del medio abiótico
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se presenta la descripción de las unidades cartográficas identificadas en el Área de Influencia del componente suelos para el presente Estudio de Impacto Ambiental EIA

5.1.5.3.1. Consociación *Ustic Haplustepts*. Símbolo MWC, perfil 4

Corresponde al tipo de relieve denominado lomas, localizadas en el centro y occidente del área de influencia del título minero, en el municipio de San Luis, vereda Payandé. Los suelos se han desarrollado sobre rocas sedimentarias arcillolitas y areniscas con intrusiones de granodiorita. El relieve presenta pendientes que varían de siete a más de 75%. Presenta erosión severa causada por escurrimiento difuso y concentrado, el cual ha formado surcos y cárcavas; hay abundante piedra superficial. La vegetación natural ha sido destruida casi en su totalidad y las tierras están prácticamente inutilizadas debido a la falta de humedad, a las fuertes pendientes y a la poca profundidad efectiva de los suelos.

En cuanto a la relación de las características fisicoquímicas y morfológicas de estos suelos, con las características de alerta que presentan los protocolos de monitoreo y seguimiento de la erosión, la salinización, la desertificación y la remoción, se puede concluir que estos suelos actualmente no presentan salinización, ya que los resultados de laboratorio muestran para sus horizontes entre 0 y 120 cm de espesor, Razón de adsorción de sodio (RAS) entre 0,14 y 0,19%, porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de 0,05%, conductividad eléctrica (CE) entre 0,34 y 0,68 dS/m, suma de cationes entre 2,26 y 5,64 mmol/L y suma de aniones de entre 0,58 y 2,51 mmol/L; asimismo no presentan compactación, esto se corrobora con la presencia de densidades aparentes entre 0,84 a 0,95 gr/cm³ y porosidad total entre 63,88 y 68,42%, esto debido en parte a las texturas gruesas (franco arcillo arenosas a franco arenosas) y el buen desarrollo estructural, por último las pendientes y el clima seco han propiciado la aparición de procesos erosivos de tipo hídrico que se refleja en actual grado de erosión severa, lo que incide enormemente en la capacidad de uso propuesta (clases VII y VIII), con uso propuesto entre forestal protector y conservación y recuperación del recurso.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Integra esta consociación los suelos Ustic Haplustepts, representado por el perfil 4. De acuerdo con las pendientes y erosión se separaron las siguientes fases:

MWCd3: fase de pendientes 12-25%, erosión severa. (Subclase VIIe, por su capacidad de uso)

MWCe3: fase de pendientes 25-50%, erosión severa. (Clase VIIe, por su capacidad de uso)

MWCf3: fase de pendientes 50-75%, erosión severa. (Clase VIIpe, por su capacidad de uso)

Suelos Ustic Haplustepts (Perfil 4)

Estos suelos se ubican en la mayor parte de la unidad; son superficiales, limitados por fragmentos de roca, son excesivamente drenados, afectados por erosión severa la cual se evidencia en la pérdida de más del 75% del horizonte A. La morfología del perfil es de tipo ABC, presenta texturas franco arcillo arenosas en superficie y franco arenosas en profundidad, colores pardo amarillentos con manchas pardo fuertes; estructura de bloques subangulares medios, fuertemente desarrollada en el horizonte superficial y débilmente desarrollada en los horizontes inferiores.

De acuerdo con los resultados de los análisis químicos, los suelos son de pH entre 8,1 en superficie y 8,4 en profundidad, no presentan aluminio disponible, la capacidad de intercambio catiónica está entre 23 y 25 cmol/Kg, son pobres en materia orgánica, la cual disminuye con la profundidad, actualmente se encuentran saturados de bases intercambiables y la disponibilidad de fósforo para las plantas es baja. Ver Fotografía 44



Fotografía 44. Ustic Haplustepts, representativo de la unidad cartográfica MWC

Fuente: Elaboración Propia

5.1.5.3.2. *Consociación Typic Ustorthents. Símbolo MWD, perfil 3*

Corresponde al tipo de relieve de cañones ubicados a lo largo del río Coello. El relieve es muy escarpado con pendientes en su mayoría superiores al 75% y con erosión moderada y algunos desprendimientos de rocas. El material parental está constituido por esquistos, principalmente los cuales afloran en un 40% (Fotografía 46) y por arenas volcánicas que originan suelos poco diferenciados, muy superficiales y excesivamente drenados. Debido a las fuertes pendientes y la fragilidad de los suelos, estas tierras deben mantenerse exclusivamente bajo cobertura vegetal protectora, para evitar los procesos erosivos.

En cuanto a la relación de las características fisicoquímicas y morfológicas de estos suelos, con las características de alerta que presentan los protocolos de monitoreo y seguimiento de la erosión, la salinización, la desertificación y la remoción, se puede concluir que estos suelos actualmente no presentan salinización, ya que los resultados de laboratorio muestran para sus horizontes entre 0 y 120 cm de espesor, Razón de adsorción de sodio (RAS) entre 0,09 y 0,52%, porcentaje de sodio intercambiable (PSI) entre 0,01 y 0,06%, conductividad eléctrica (CE) entre 0,11 y 0,46 dS/m, suma de cationes entre 0,62 y 3,24 mmol/L y suma de aniones de entre 1,4 y 1,61 mmol/L; asimismo no presentan compactación, esto se corrobora con la presencia de densidades aparentes entre 0,85 a 1,09 gr/cm³ y porosidad total entre 59,3 y 68,75%, esto debido en parte a las texturas medias (francas) y el buen desarrollo estructural, por último las pendientes y el clima seco han propiciado la aparición de procesos erosivos de tipo hídrico que se refleja en actual grado de erosión moderada, lo que incide enormemente en la capacidad de uso propuesta (clases VI, VII y VIII), con uso propuesto entre Agroforestal con sistemas agrosilvopastoriles, en zonas de pendientes hasta del 50%, forestal protector en pendientes entre 50 y 75% y conservación y recuperación del recurso en pendiente superiores al 75%.

Integran esta unidad los suelos Typic Ustorthents en un 75% e inclusiones de afloramientos rocosos en un 25%.

Se separaron las siguientes fases:

MWDg2: fase de pendiente mayor de 75 %, erosión moderada. (Clase VIIIp, por su capacidad de uso)

Suelos Typic Ustorthents (Perfil 3)

Se ubican en las áreas menos escarpadas de la unidad y se caracterizan por mostrar un horizonte A de 25 cm de espesor, color pardo grisáceo, textura franca y estructura poco desarrollada; descansa directamente sobre un horizonte C dividido en dos subhorizontes (25-58 y 58-120), de color pardo grisáceo, textura franca y sin estructura. De acuerdo con los análisis químicos son suelos con pH entre 8,1 y 8,2, de capacidad catiónica de cambio alta, saturación total de bases alta, contenido de materia orgánica bajo y contenido de fósforo disponible para las plantas bajo. Fotografía 45



Fotografía 45. Typic Ustorthents de la unidad MWC



Fotografía 46. Afloramientos rocosos

Fuente: Elaboración Propia

5.1.5.3.3. Asociación *Typic Ustorthents* y *Typic Haplustalfs*. Símbolo PWH, Perfiles 1 y 2

Esta unidad hace parte del abanico de Ibagué compuesto por materiales tobáceos, cantos y bloques de roca volcánica, se localiza a lo largo del río Coello en el municipio de San Luis. El relieve es plano a ligeramente inclinado con pendientes inferiores a 7%. Los suelos están afectados por erosión ligera y por fenómenos de escurrimiento difuso y concentrado, que originan surcos. La vegetación natural ha sido destruida y las tierras utilizadas en ganadería extensiva. Esta unidad cartográfica es una asociación integrada por los suelos *Typic Ustorthents* (Perfil 2) en un 60% y *Typic Haplustalfs* (Perfil 1) en un 40%.

En cuanto a la relación de las características fisicoquímicas y morfológicas de estos suelos, con las características de alerta que presentan los protocolos de monitoreo y seguimiento de la erosión, la salinización, la desertificación y la remoción, se puede concluir que estos suelos actualmente no presentan salinización, ya que los resultados de laboratorio muestran para sus horizontes entre 0 y 120 cm de espesor, Razón de adsorción de sodio (RAS) entre 0,11 y 0,40%, porcentaje de sodio intercambiable (PSI) entre 0,06 y 0,45%, conductividad eléctrica (CE) entre 0,14 y 0,57 dS/m, suma de cationes entre 1,67 y 7,35 mmol/L y suma de aniones de entre 0,89 y 1,49 mmol/L; asimismo no presentan compactación, esto se corrobora con la presencia de densidades aparentes entre 0,89 a 1,10 gr/cm³ y porosidad total entre 58,89 y 68,33%, esto debido en parte a las texturas medias (franco arenosas a franco arcillo arenosas en su mayoría) y el buen desarrollo estructural, por último el clima seco ha propiciado la aparición de procesos erosivos de tipo hídrico que se refleja en actual grado de erosión ligera, lo que incide ligeramente en la capacidad de uso propuesta (clase VI), con uso propuesto para ganadería con pastoreo extensivo.

Se separó la siguiente fase:

PWHab1: fase de pendientes 1-3-7%, con erosión ligera. (Subclase VIs, por su capacidad de uso).

Suelos Typic Ustorthents (Perfil 2)

Se ubican en los límites con la unidad MWD en sectores que se asimilan a los ápices del abanico. Estos suelos son poco desarrollados, con un perfil A/C, de textura franco arenosa con pedregosidad tipo gravilla, color pardo a pardo oscuro en los primeros 25 cm y gris oliva en profundidad, la estructura es blocosa y débilmente desarrollada. Desde el punto de vista químico son suelos con pH de 7,4 en superficie y 8,2 en profundidad, con abundantes carbonatos; pobres en materia orgánica, de capacidad catiónica de cambio alta en el horizonte superficial y media en profundidad, totalmente saturados de bases y disponibilidad de fósforo para las plantas muy alta en superficie, media en el siguiente horizonte y alta en profundidad. Fotografía 47

Suelos Typic Haplustalfs (Perfil 1)

Se localizan en los sectores más planos y alejados de la zona montañosa; son muy superficiales, limitados por un horizonte endurecido (argílico); son suelos moderadamente bien drenados, de texturas finas a medias y color pardo grisáceo en superficie y gris oscuro en profundidad. Muestra una morfología tipo A/Bt: el horizonte superficial A posee 20 cm; el Bt es muy duro, tiene estructura blocosa gruesa, débilmente desarrollada, casi masivo, está subdividido en Bt1 de 37 cm y Bt2 de más de 53 cm, son de textura franco arcillo arenosa. Químicamente estos suelos poseen pH entre 7,1 en superficie y 7,8 y 8,0 en profundidad, pobres en materia orgánica, de capacidad catiónica de cambio media a baja, saturación total de bases y contenido de fósforo asimilable para las plantas bajo. Fotografía 48



Fotografía 47. Typic Ustorthents de la unidad MWD



Fotografía 48. Typic Haplustalfs de la unidad MWD

Fuente: Elaboración Propia

5.1.5.4. Clasificación agrológica y uso potencial

Después de reconocer los suelos de un área de estudio determinada y su patrón de distribución en la dimensión espacial, el objetivo más importante de los levantamientos agrológicos es la definición de su capacidad de uso y las prácticas de manejo, de tal manera que el desarrollo agrícola, ganadero y forestal, así como las acciones encaminadas a la conservación, preservación y/o restauración del medio natural, se ejecuten de acuerdo con la vocación de las tierras y a los requerimientos de protección cuando son vulnerables ante la acción de los factores ambientales y la actividad del hombre (IGAC, 2014).

De acuerdo con lo presentado en la Metodología del presente Estudio de Impacto Ambiental, y según las normas adoptadas por el IGAC del Sistema de Clasificación de Tierras por Capacidad de Uso, la clasificación agrológica se realiza por clases, establecidas básicamente por la capacidad de uso agrícola, pecuario, forestal o de conservación, sus limitaciones, riesgos de daños y formas como responden al manejo. Según este sistema, existen 8 categorías y se designan con números arábigos de 1 a 8, y está estructurado de forma tal que a medida que se incrementa la clase por capacidad agrológica disminuye la gama de cultivos a escoger, se incrementan las prácticas de manejo y aumenta significativamente la necesidad de proteger el recurso.

El sistema de clasificación es multicategorico: en el nivel más alto de abstracción está entonces la clase, en el nivel intermedio la subclase y en el nivel inferior de la pirámide, el grupo de manejo. De acuerdo con las limitaciones, se obtienen luego las subclases de capacidad, que son categorías del sistema de clasificación por capacidad de uso, que especifican en las clases 1 a la 8, uno o más factores limitantes generales y específicos para las unidades de suelos. En términos generales se conocen limitaciones por pendiente (p), erosión (e), humedad en exceso (h), suelo (s) y clima (c). Cuando se presenta más de una se incluyen en el símbolo cartográfico en el orden en el que se mencionaron previamente, agregando a la correspondiente clase, una o más de dichas letras minúsculas respectivamente. Los grupos de manejo se definen con base en las limitaciones específicas como la temperatura, la distribución de las lluvias y las características particulares de los suelos, conllevando a que en una misma subclase se puedan establecer uno, dos o más grupos (IGAC, 2014).

Contemplando lo anterior, a través de una matriz en una hoja de cálculo que contiene los parámetros definidos por la Metodología del IGAC (IGAC, 2014) y se alimenta con la información de los perfiles modales levantados en campo y con los resultados de los análisis fisicoquímicos determinados en laboratorio para los cuatro puntos de monitoreo de suelos (perfiles modales de suelos), se determina finalmente la clasificación agrológica de los mismos.

Para el presente estudio, la clasificación de las tierras por su capacidad de uso se refiere entonces al potencial que tienen las tierras para ser utilizadas bajo cierto tipo general de uso con prácticas de manejo específicas (IGAC - CORPOICA, 2002); se determina con la agrupación de las unidades cartográficas de suelos - UCS, según las clases agrológicas establecidas y teniendo en cuenta los limitantes de uso establecidos. Así, mediante la interpretación de las características morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas de los suelos y la evaluación de características externas como relieve, pendientes, erosión, inundaciones, pedregosidad y clima, se constituyen los criterios para cada unidad de tierras por su capacidad de uso.

Para el área de influencia del componente geosférico, se identificaron suelos de las clases 6, 7 y 8. En la Tabla 20 se relaciona cada unidad de suelo con la clasificación agrológica final definida, así como la descripción de la aptitud general de uso de dichos suelos y el uso potencial que se determinó según dichas clasificaciones. La representación gráfica de los usos potenciales definidos en el área de influencia puede observarse en la Figura 44 y en el plano CAP05.1-CMAB-LAES745-SUEL-003.

Tabla 20. Clases y subclases agrológicas y uso potencial del suelo en el área de estudio

Clase y subclase agrológica	Unidades de suelos	Principales características	Uso potencial principal	Área en el AIAB	%
VIs	PWHab1	Suelos desarrollados en pendientes entre 1 y 7%, ligeramente erosionados, de texturas medias, muy superficiales, con sectores con horizontes compactados en profundidad, con abundante pedregosidad en el perfil. Perfiles pobres en materia orgánica, totalmente saturados de bases.	Ganadería con pastoreo extensivo (PEX)	2,77	18,65
VIIe	MWCd3, MWCe3	Suelos en pendientes entre 12 y 50%, severamente erosionados, superficiales, limitados por fragmentos de roca en profundidad, con texturas medias a moderadamente gruesas, capacidad de intercambio catiónica alta, pobres en materia orgánica, saturados de bases intercambiables y baja disponibilidad de fósforo para las plantas.	Forestal con sistemas forestales protectores (FPR) no limitante para actividades mineras con sus respectivas licencias	2,29	15,44
VIIpe	MWCf3	Suelos en pendientes entre 50 y 75%, severamente erosionados, limitados por fragmentos de roca en profundidad, pH entre 8,1 en superficie y 8,4 en profundidad, capacidad de intercambio catiónica alta, pobres en materia orgánica, saturados de bases intercambiables y baja disponibilidad de fósforo para las plantas.	Forestal con sistemas forestales protectores (FPR) no limitante para actividades mineras con sus respectivas licencias	4,16	27,99
VIIIp	MWDg2	Suelos en pendientes superiores al 75%, moderadamente erosionados, con morfología ABC o AC, superficiales, limitados por fragmentos de roca en profundidad, con texturas medias a moderadamente gruesas, pH neutros a ligeramente alcalinos, capacidad de intercambio catiónica alta, pobres en materia orgánica, saturados de bases intercambiables y baja disponibilidad de fósforo para las plantas.	Conservación y/o recuperación de la naturaleza (CRE)	0,001	0,005
VIIIe	Zonas de extracción minera	Áreas sin suelo actualmente, dedicada a la minería	Conservación y/o recuperación de la naturaleza (CRE)	5,64	37,94

Fuente: Elaboración Propia

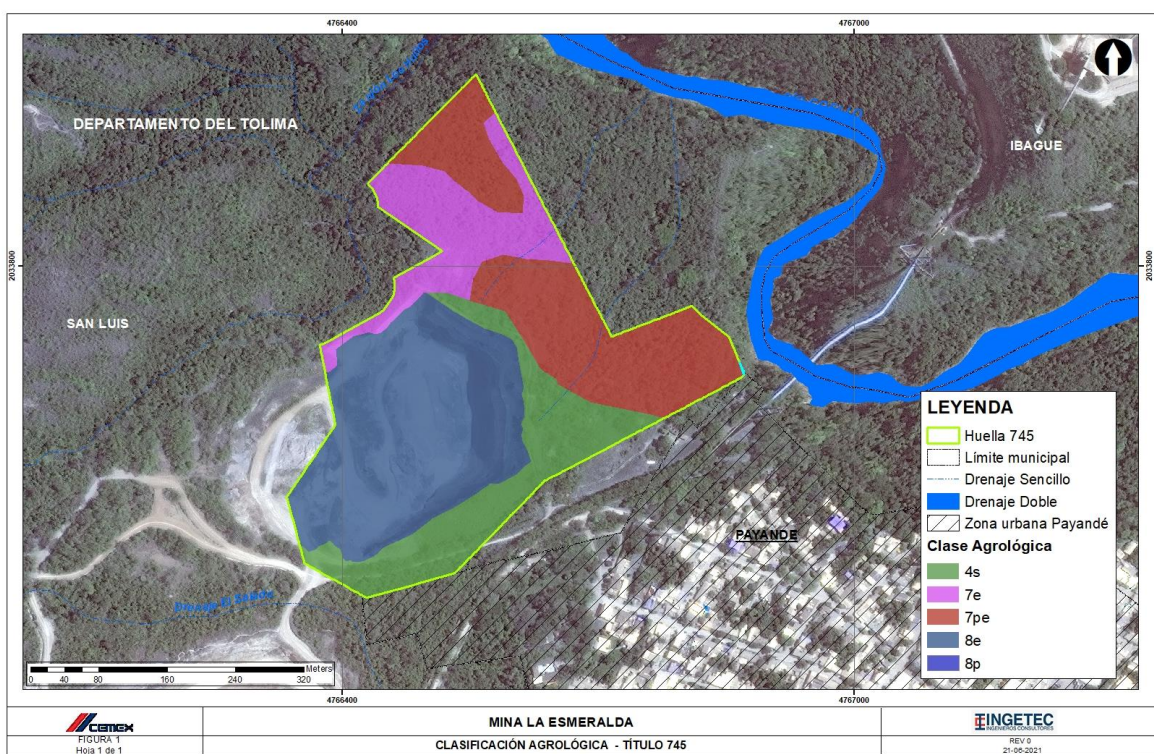


Figura 45. Mapa uso potencial de los suelos en el área de influencia abiótica
Fuente: Elaboración Propia

5.1.5.5. Uso actual

El término cobertura se aplica en un todo o en parte a algunos de los atributos de la tierra y que en cierta forma ocupan una porción de su superficie, por estar localizados sobre esta. El término uso se aplica al empleo que el hombre da a los diferentes tipos de coberturas, cíclica o permanentemente, para satisfacer sus necesidades materiales o espirituales (IGAC - CORPOICA, 2002).

El uso actual del suelo se encuentra definido por las actividades a las que la zona de estudio está sometida en el momento del desarrollo de la fase de campo y según las coberturas de la tierra presentes, las cuales se determinaron por medio de fotointerpretación y verificación en campo. En la Tabla 21 se presentan los principales usos actuales del suelo para el área de influencia, Figura 45 y en el plano CAP05.1-CMAB-LAES745-SUEL-004.

Tabla 21. Cobertura y uso actual del suelo

Descripción cobertura	Grupo uso	Subgrupo uso	código	ha	%
Bosque de galería	Conservación	Conservación y/o recuperación de la naturaleza	CRE	7,01	47,15
Vegetación secundaria alta					
Tierras desnudas y degradadas					
Pastos arbolados	Ganadería	Pastoreo extensivo	PEX	1,39	9,34
Pastos enmalezados					
Pastos limpios					
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Infraestructura	Transporte	INF	0,39	2,09
Zonas de extracción minera	Zonas de extracción Minera	Explotación de material de construcción	MIN	6,17	41,51

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con las coberturas de la tierra identificadas y en relación con el uso actual de los suelos; el área de estudio se caracteriza principalmente por zonas dedicadas a la Conservación y/o recuperación de la naturaleza (47,15% del AI) en coberturas de Bosque de galería, vegetación secundaria alta y tierras desnudas y degradadas, continúan las áreas de minería (41,51% del AI) sobre zonas de extracción minera (Fotografía 50). Las zonas dedicadas a la ganadería con pastoreo extensivo ocupan el 9,34% representadas por pastos arbolados, pastos limpios y pastos enmalezados (Fotografía 49), por último las zonas de infraestructura ocupan el 2,09%, siendo representadas por las coberturas de redes ferroviarias, viales y terrenos asociados.



Fotografía 49. Tierras dedicadas a la ganadería con pastoreo extensivo



Fotografía 50. Zonas de extracción minera

Fuente: Elaboración Propia

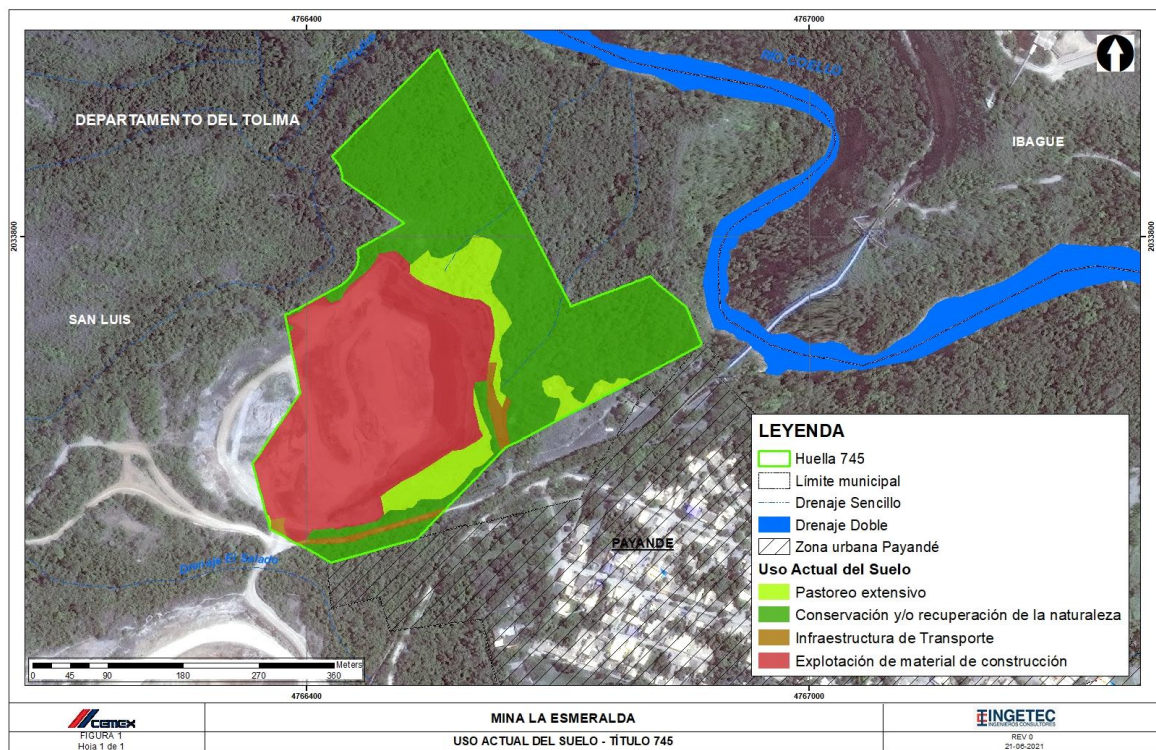


Figura 46. Mapa de uso actual de los suelos en el área de influencia abiótica
Fuente: Elaboración Propia

5.1.5.6. Conflictos de uso del suelo

Los conflictos de uso de la tierra son el resultado de la discrepancia entre el uso que el hombre hace actualmente del medio natural y aquel que debería tener de acuerdo con la oferta ambiental. Se originan por diversas causas entre las que sobresalen la desigualdad en la distribución de tierras y el manejo no planificado de la relación uso - tierra en una determinada región. Los conflictos del uso de la tierra se presentan cuando las tierras son utilizadas inadecuadamente ya sea por sobreutilización o subutilización.

En la determinación de conflictos se aplica el procedimiento que se utiliza en el país para generar la información de conflictos de usos del territorio (IGAC - CORPOICA, 2002). Se compara espacialmente con el uso de un sistema de información geográfica – SIG; el mapa de usos actuales versus el mapa de capacidad de uso (clases agrológicas) o uso potencial y se analiza con una matriz de doble entrada las unidades resultantes. El objetivo es identificar aquellas unidades espaciales en las cuales los usos actuales corresponden o no con la capacidad de uso del territorio.

Aquellos suelos donde el agroecosistema existente corresponde con la vocación del uso potencial o con un uso compatible sin causar deterioro ambiental y manteniendo actividades adecuadas y concordantes con la productividad natural de las tierras, se definen como lugares geográficos en los cuales existen las condiciones ambientales propicias para el desarrollo de los usos actuales, por lo cual se recomienda evitar que entren en algún tipo de conflicto. Cuando se presentan diferencias entre el uso actual y el potencial se dan dos escenarios:

- Subutilización del suelo: hace referencia al uso actual que es menos intensivo que el uso potencial. Cuando el agroecosistema existente corresponde a un nivel inferior de intensidad de uso si se compara con la mayor capacidad productiva de las tierras.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

- Sobreuso del suelo: cuando las exigencias del uso actual o cobertura vegetal existente son mayores que la oferta productiva del suelo de acuerdo con sus características agroecológicas. En estas tierras se hace un aprovechamiento intenso de la base natural de recursos, sobrepasando su capacidad natural productiva y propiciando graves riesgos de tipo ecológico y social. Tabla 22

Por sobreuso y subutilización se presentan niveles de diferencias que dan lugar a conflictos como los siguientes:

Tabla 22. Tipos de conflictos de uso del suelo y símbolo utilizado

Tipos de Conflicto	Símbolo
Uso adecuado	A
Subutilización ligera	S1
Subutilización moderada	S2
Subutilización severa	S3
Sobreutilización ligera	O1
Sobreutilización moderada	O2
Sobreutilización severa	O3

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la capacidad agrológica y el tipo de uso actual del suelo, se clasificaron las variables correspondientes a estos parámetros, dando como resultado 5 categorías de conflicto de uso que dependen principalmente del uso y manejo de los suelos y del manejo adecuado de los recursos naturales renovables y no renovables que permiten la concordancia y el equilibrio sistémico de la zona (Tabla 23, Figura 46 y en el plano CAP05.1-CMAB-LAES745-SUEL-005)

Tabla 23. Conflicto de usos de suelo en el área de influencia del proyecto

Uso potencial	Uso actual	Conflictos de uso	ha	%
Conservación y/o recuperación de la naturaleza	Conservación y/o recuperación de la naturaleza	Uso adecuado	13,19	88,70
	Zonas de extracción Minera			
Forestal con sistemas forestales protectores (FPR)	Conservación y/o recuperación de la naturaleza			
	Zonas de extracción Minera			
Ganadería con pastoreo	Zonas de extracción Minera			

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Uso potencial	Uso actual	Conflictos de uso	ha	%
extensivo (PEX)	Infraestructura de transporte			
	Pastoreo extensivo			
Forestal con sistemas forestales protectores (FPR)	Ganadería con pastoreo extensivo	Sobreutilización moderada	0,47	3,16
Conservación y/o recuperación de la naturaleza	Ganadería con pastoreo extensivo	Sobreutilización severa	0,03	0,21
Ganadería con pastoreo extensivo	Conservación y/o recuperación de la naturaleza	Subutilización moderada	1,18	7,96

Fuente: Elaboración Propia

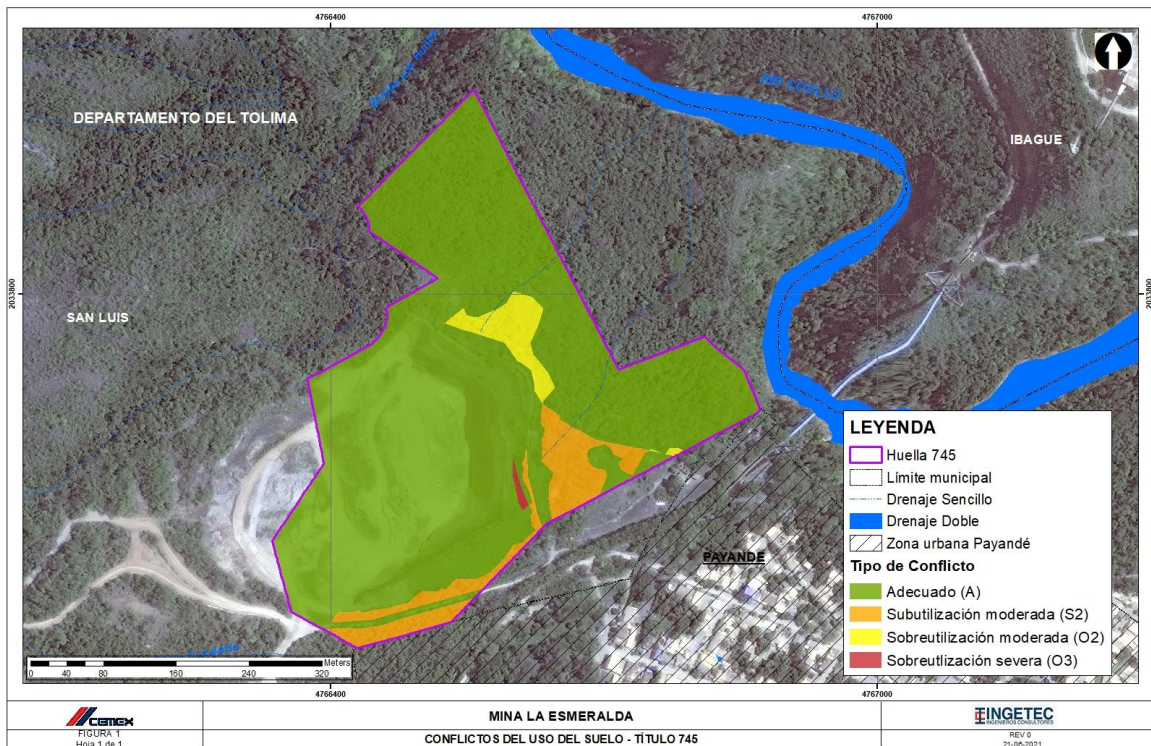


Figura 47. Mapa de conflictos de uso de los suelos en el área de influencia edáfica

Fuente: Elaboración Propia

- Tierras sin conflicto de uso (A)

Teniendo en cuenta que la clasificación de conflictos de uso tienen un enfoque edáfico con fines productivos, bajo este título se han clasificado las áreas de terreno donde el agroecosistema existente guarda correspondencia con la vocación de uso principal. También se califican como áreas sin conflictos de uso, vías, zonas mineras licenciadas, zonas urbanas etc y demás infraestructura que exista previa al análisis del presente proyecto. En el área de influencia las zonas sin conflictos de uso ocupan un área de 13,19 ha que equivalen al 88,70%.

- Subutilización moderada (S2)

Suelos cuyo uso actual está medianamente por debajo de la clase de vocación de uso principal recomendada de acuerdo con la capacidad de producción de las tierras. En las áreas de estudio presenta suelos que de acuerdo con su potencial tienen una aptitud de uso para actividades pecuarias extensivas, pero se encuentran actualmente en usos conservacionistas; suman 1,18 ha (7,96%) del área de influencia.

- Sobreutilización moderada (O2)

Tierras cuyo uso actual está moderadamente por encima de la clase de vocación recomendada de acuerdo con su capacidad de uso; en la zona de estudio, representa tierras con vocación forestal protectora, en usos actuales pecuarios (pastoreo extensivo). En total en el área de influencia del componente geosférico, las tierras con categoría de conflicto por sobreutilización moderada (O2) suman 0,47 ha (3,16%) del área de influencia.

- Sobreutilización severa (O3)

Tierras cuyo uso actual está muy por encima de la clase de vocación recomendada de acuerdo con su capacidad de uso. En las áreas con conflicto por sobreutilización severa podría darse la posibilidad de encontrar rasgos visibles de deterioro de los recursos tales como la presencia de procesos erosivos activos. En las áreas de estudio los conflictos por sobreutilización severa se presentan en suelos con vocación conservacionista (recuperación de la naturaleza y sistemas forestales protectores), que se encuentran actualmente sistemas agrosilvopastoriles y pastoreo extensivo; suman 0,03 ha (0,21%) en el área de influencia.

5.1.5.7. Usos de los suelos con respecto al ordenamiento territorial.

Considerando la información recopilada para el uso potencial de los suelos en la zona de estudio, se procedió a comparar dicha información con respecto a aquella, contenida en los documentos y la cartografía emitida dentro del Esquema de Ordenamiento Territorial - EOT del municipio de San Luís y adoptado por el concejo municipal en 2002.

El propósito fue identificar espacialmente lo definido por el municipio en la etapa de diagnóstico del EOT, en cuanto a la aptitud de los suelos y luego, poder establecer posibles compatibilidades o incompatibilidades de uso de los suelos entre lo establecido por el municipio y lo determinado para el presente estudio; se decidió considerar la información consignada en este diagnóstico, teniendo en cuenta que es la información oficial vigente que permite cartográficamente realizar comparaciones; sin embargo, debe tenerse en cuenta que el nivel de detalle del documento mencionado es menor que el del presente estudio, lo que podría evidenciar diferencias entre las consideraciones generadas por el municipio y las definidas dentro del estudio de suelos.

El área de influencia del componente geosférico intercepta con:

Áreas de producción económica agropecuaria y minera, cubren un área de 13,46 ha que equivalen al 82,48% del área de influencia edáfica del proyecto. Dichas zonas contienen la mayor parte del título minero 745.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Áreas de significancia ambiental, riesgo y recuperación, cubren un área de 2,85 ha que equivalen al 17,52% del área total. Dichas áreas se interceptan con el título minero en su costado oriental

Considerando las diferencias en cuanto al mayor nivel de detalle del presente estudio, comparado con la información consignada en el EOT se observa una concordancia con respecto a lo expuesto por el municipio, sin embargo con respecto a las áreas de significancia ambiental se puede analizar del EOT que la escala de trabajo, la fecha de elaboración de la cartografía y los insumos cartográficos no permitieron llegar a la precisión que se ha logrado en el presente estudio. Figura 47

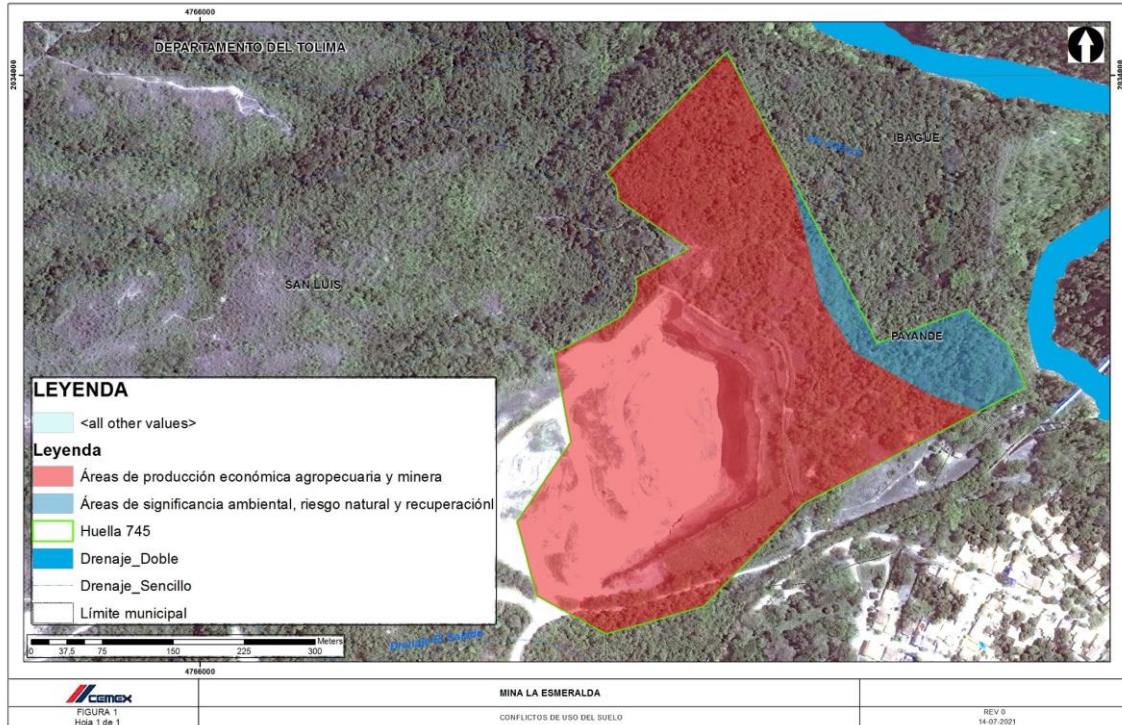


Figura 48. Uso propuesto del EOT en el área de influencia edáfica

Fuente: Elaboración Propia

La situación es similar con respecto a la información presentada en los Pomcas de los ríos Coello y La Luisa, en cuanto a la capacidad de uso de las tierras, las cuales han sido categorizadas en tres clases. Figura 48

Tierras clase 4: Con capacidad agrícola y pecuaria que correlacionan con el EIA en las zonas más planas que corresponden al abanico.

Tierras clase 7: Con capacidad agrícola, ganadera y forestal, las cuales correlaciona con el EIA en las áreas delimitadas de lomas

Tierras clase 8: Que no presentan capacidad para actividades productivas y que correlacionan con el EIA en las áreas del cañón del río Coello

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Es claro sin embargo que los trazos de las unidades individualizadas de suelos en el Pomca, no brindan el detalle al cual se ha llegado en el presente EIA.



Figura 49. Clases agrológicas 4 (azul claro), 7 (café claro) y 8 (morado), en el área del título minero 745, según los Pomcas La Luisa y Coello, de fondo se observa el mapa de sombras y las curvas de nivel.

Fuente: Geovisor Ambiental Cortolima, 2020

5.1.6. Hidrología.

5.1.6.1. Caracterización hidrológica

En el presente capítulo se incluyen los resultados de la caracterización hidrológica del área de estudio a partir de la información cartográfica, hidrométrica y climatológica disponible, así como de las huellas del proyecto.

Los análisis llevados a cabo en el presente numeral consisten en la caracterización morfométrica de las subcuencas identificadas a partir de la red de drenaje a escala 1:25000 de la plancha IGAC 245IIC y de cartografía detallada del proyecto que cuenta con curvas de nivel cada 2 m.

Se presenta la caracterización hidrológica en términos de caudales medios, máximos y caudal ambiental para estas unidades hidrográficas localizadas en el área de estudio.

Por último se presentan los valores de los índices de regulación hídrica, aridez, escasez y de vulnerabilidad al desabastecimiento en cada una de las subcuencas caracterizadas según los valores regionales presentados en el Estudio Nacional del Agua, 2010 y se estimaron a partir de la caracterización hidrológica de las subcuencas en estudio (curvas de duración de caudales, ETP, ETR).

5.1.6.1.1. Localización del proyecto en la zonificación nacional

El sistema hídrico analizado está compuesto principalmente por la cuenca del río Coello y tres afluentes por margen derecha: quebrada Los Huilos, y dos drenajes cuyos nombres no pudieron ser identificados con la información cartográfica disponible por lo que fueron denominados drenajes 1 y drenaje 2. Además, al sur del área de estudio se identificó el drenaje El Salado, que es tributaria a la quebrada El Cobre. A continuación, se presenta la localización del proyecto.

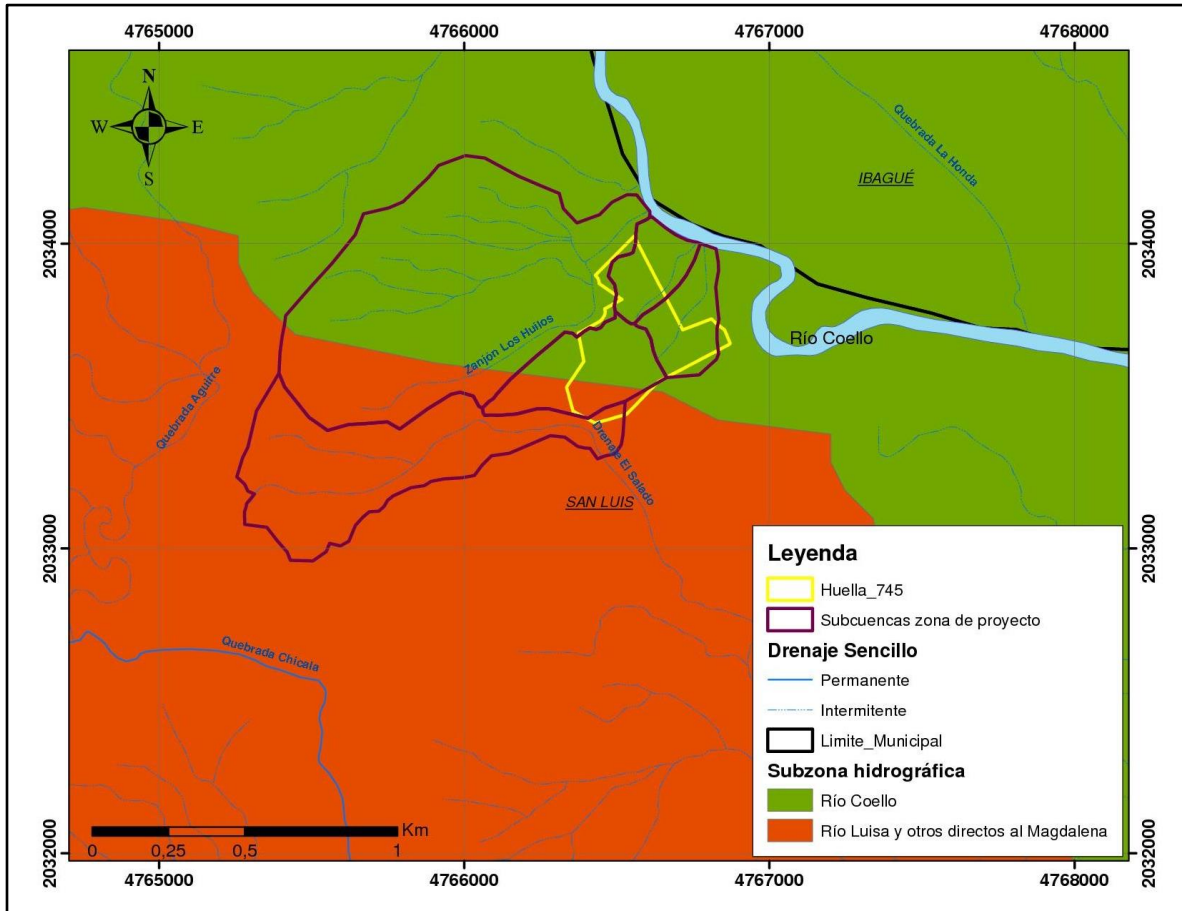


Figura 50. Localización del proyecto en la zonificación Hidrográfica

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la clasificación hidrográfica de las subcuencas con base en lo establecido en el mapa de Zonificación Ambiental de Colombia¹¹, y mencionado dentro de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, expedida en marzo de 2010 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y plasmadas igualmente dentro del Decreto 1640 del 2 de agosto de 2012 del MADS y la Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia del IDEAM (2013), de los cuales se derivan para el territorio colombiano: 5 Áreas Hidrográficas, 41 Zonas Hidrográficas y 309 Subzonas Hidrográficas.

De acuerdo con la zonificación hidrográfica establecida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el informe de "Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia" (IDEAM,

¹¹ IDEAM, Mapa de Zonificación Ambiental de Colombia, 2010.

2014), el proyecto se localiza en el área hidrográfica Magdalena Cauca (Código IDEAM 2), Zona hidrográfica Alto Magdalena (Código IDEAM 21) y la subzona hidrográfica río Coello (Código IDEAM 2121). Para los niveles subsiguientes se utilizarán los presentados a continuación:

Tabla 24. Localización del proyecto en la zonificación Hidrográfica

Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	Unidad hidrográfica Nivel I	Unidad hidrográfica Nivel II	Unidad hidrográfica Nivel III
Magdalena Cauca	Alto Magdalena	Río Coello	Río Coello	Río Coello	Drenaje NN 1
					Drenaje NN 2
					Zanjón Los Huilos
		Río Luisa y otros directos al Magdalena	Río Luisa	Quebrada El Cobre	Drenaje El Salado

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.2. Identificación de sistemas lénticos y lóticos

Como se mencionó previamente en el área de estudio se identificó que el sistema hídrico de la zona está compuesto principalmente por el río Coello y tres cauces afluentes por su margen derecha, además se identificó el drenaje El Salado que es tributario a la quebrada El Cobre.

A continuación, se presenta la descripción de los sistemas lóticos identificados:

- Afluentes al río Coello

El principal sistema hídrico de la zona de estudio corresponde al río Coello, el cual nace en el municipio de Ibagué y confluye al río Magdalena luego de un recorrido de aproximadamente 103 km, su cuenca se desarrolla también en el municipio de Cajamarca, la variación altitudinal de su cuenca es entre 1000 msnm a 700 msnm en la zona de estudio. Con la red de drenaje disponible se identificaron cuatro cauces tributarios por margen derecha: 1.subcuenca del zanjón Los Huilos, la cual nace a la cota 750 msnm y confluye con el río Coello a la cota 600 msnm, 2. subcuenca del drenaje 1 la cual nace aproximadamente a la cota 700 msnm y confluye en el río Coello a la cota 570 msnm, finalmente se identificó la subcuenca del drenaje 2 que nace en la cota 720 msnm y tiene su confluencia al río Coello a la cota 570 msnm. Estos drenajes NN1 y NN2 corresponden a drenajes estacionales, es decir, depresiones topográficas que transportan escorrentía superficial en un evento de precipitación, afluentes al río Coello en su margen derecha que podrían tener afectación por la extracción del material y conformación del tajo minero.

- Afluentes a la quebrada El Cobre

Dentro del área de estudio se identifica la subcuenca del drenaje El Salado, que nace a la cota 800 msnm y confluye a la quebrada El Cobre en la cota 575 msnm, su cuenca se desarrolla en el municipio de San Luis. Finalmente la quebrada El Cobre es tributaria del río La Luisa.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

En la Tabla 25 se presentan las coordenadas identificadas a partir de la cartografía base de los puntos de confluencia de los tributarios analizados al río Coello y a la quebrada El Cobre respectivamente. Y en la Figura 50 se presenta la red de drenaje en la zona de estudio.

Tabla 25. Coordenadas sistemas lóticos confluencia al río al que tributa

Cauce	Río al que tributa	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
Drenaje NN 1	Río Coello	4766785	2033996
Drenaje NN 2	Río Coello	4766721	2034012
Zanjón Los Huilos	Río Coello	4766567	2034146
Drenaje El Salado	Quebrada El Cobre	4767338	2028152

Fuente: Elaboración propia.

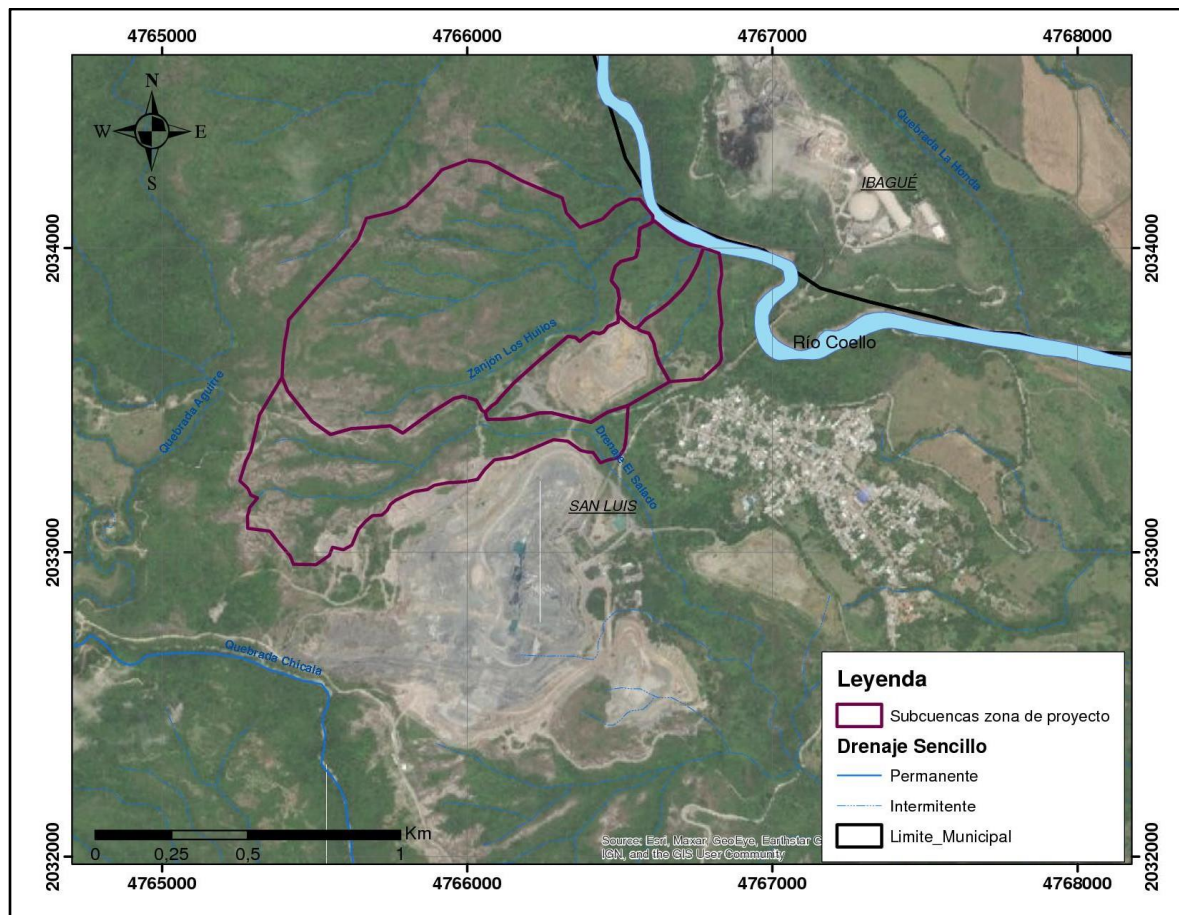


Figura 51. Red de drenaje en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.3. Caracterización morfométrica

Para la delimitación de las subcuencas asociadas a la red de drenaje de interés se empleó la cartografía IGAC a escala 1:25.000, definiendo las divisorias de agua asociadas a las subcuencas hidrográficas y se determinando las principales características morfométricas las cuales se describen a continuación:

Área de drenaje: es la superficie del terreno que contribuye al escurrimiento hacia el cauce principal y sus tributarios, delimitada por la divisoria de aguas o línea imaginaria que se ubica en los puntos de mayor elevación topográfica.

Perímetro: corresponde a la longitud de la línea divisoria de la cuenca de drenaje.

Longitud del cauce principal: es la distancia medida desde el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de cierre de la misma.

Coefficiente de compacidad: el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius permite determinar la irregularidad de la cuenca. Se define como la relación entre el perímetro y la longitud de la circunferencia correspondiente a un círculo de igual área de la cuenca, según la Ecuación 1.

Variables:

P es el perímetro en kilómetros

A es el área de la cuenca en k².

$$Kc = 0,282 \frac{P}{A^{0,5}}$$

Ecuación 1.

Fuente: (Germán Monsalve Sáenz, 1995).

Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Este coeficiente define la forma de la cuenca respecto a la similitud con formas redondas dentro de los rangos que se muestran en la Tabla 26 determinados por la FAO (FAO, 1985).

Tabla 26. Clasificación del coeficiente de compacidad.

Rango	Descripción
1,00 – 1,25	Redonda a oval redonda
1,25 – 1,50	Oval redonda a oval oblonga
1,50 – 1,75	Oval oblonga a rectangular oblonga
> 1,75	Rectangular oblonga

Fuente: FAO, 1985.

Factor de forma: índice que permite establecer la tendencia morfológica general en función de la longitud axial de la cuenca y de su área promedio. Una cuenca tiende a ser alargada si el factor de forma tiende a cero, mientras que su forma es redonda en la medida que el factor de forma tiende a uno.

Este factor es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca, teniendo en cuenta que aquellas cuencas con formas alargadas tienden a presentar un flujo de agua más veloz en comparación de las cuencas redondeadas, logrando una evacuación más rápida y mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base principalmente (Ecuación 2).

Variables:

A es el área de drenaje de la cuenca en km²

L es la longitud axial de la cuenca en km, distancia en línea recta entre la parte más alta de la cuenca y la parte más baja o de desembocadura (FAO, 1985).

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Ecuación 2.

Fuente: (Germán Monsalve Sáenz, 1995).

Densidad de drenaje: Corresponde a la relación entre la longitud total de los cuerpos de agua dentro de la cuenca en Km y el área total de ésta en Km². Generalmente se expresa en km/km² y toma valores entre 0,5 para cuencas con drenaje pobre y 3,5 para cuencas excepcionalmente bien drenadas (Monsalve, 1991) y es calculado mediante la Ecuación 3.

Variables:

D_d es la densidad de drenaje en km/km²

L es la longitud de cauces en km

A es el área total de la cuenca en km²

$$D_d = \frac{\Sigma L}{A}$$

Ecuación 3.

Fuente: (Germán Monsalve Sáenz, 1995).

Tiempo de concentración: es el tiempo que toma el agua superficial en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de interés. El tiempo de concentración se calculó a partir de diferentes metodologías con el fin de aumentar el grado de certeza. En la Tabla 27 se presentan las diferentes metodologías utilizadas.

Tabla 27. Formulaciones empíricas para el cálculo del tiempo de concentración.

Fórmula	Ecuación	Parámetros
Kirpich	$T_c = 0,06628 \left(\frac{L_D}{S} \right)^{0,77}$	<p>T = Tiempo de concentración de la cuenca (h)</p> <p>L = Longitud del cauce principal (km)</p> <p>S = Pendiente media del cauce principal (m/m)</p>
Témez	$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{S} \right)^{0,76}$	<p>T = Tiempo de concentración de la cuenca (h)</p> <p>L = Longitud del cauce principal (km)</p> <p>S = Pendiente media del cauce principal (%)</p>

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Fórmula	Ecuación	Parámetros
Williams	$Tc = 0,683 \left(\frac{LA^{0,40}}{DS^{0,25}} \right)$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (h) L = Longitud del cauce principal (km) D = Diámetro de una cuenca circular con área A (km) A = Área de la cuenca (km ²)
Bransby – Williams	$Tc = \frac{14,6L}{A^{0,1}S^{0,2}}$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (min) L = Longitud del cauce principal (km) S = Pendiente media del cauce principal (m/m) A = Área de la cuenca (km ²)
Giandotti	$Tc = \left(\frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25,3\sqrt{LS}} \right)$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (h) L = Longitud del cauce principal (km) S = Pendiente media del cauce principal (m/m) A = Área de la cuenca (km ²)
Johnstone y Cross	$Tc = 2,6 \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,5}$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (h) L = Longitud del cauce principal (km) S = Pendiente media del cauce principal (m/km)
SCS – Ranser	$Tc = 0,947 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (h)

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Fórmula	Ecuación	Parámetros
		L = Longitud del cauce principal (km) H = Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente principal (m)
Ventura – Heras	$Tc = 0,3 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,75}$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (h) L = Longitud del cauce principal (km) S = Pendiente media del cauce principal (%)
Ven Te Chow	$Tc = 0,273 \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,64}$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (h) L = Longitud del cauce principal (km) S = Pendiente media del cauce principal (m/m)
Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos	$Tc = 0,28 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$	T = Tiempo de concentración de la cuenca (h) L = Longitud del cauce principal (km) S = Pendiente media del cauce principal (m/m)

Fuente: Tomada y adaptada de (Germán Monsalve Sáenz, 1995, INVIAS, 2009 y Chow, Maidment, & Mays, 1994)

En el CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.011 se presenta el tiempo de concentración estimado para las subcuencas identificadas y los tiempos seleccionados. El tiempo de concentración adoptado se estimó mediante el cálculo del promedio (μ) y la desviación estándar (σ), descartando los valores fuera del rango $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ y hallando el promedio con los valores dentro de dicho rango.

Pendiente media de la cuenca: para estimar la pendiente media de las subcuencas se empleó un modelo digital de terreno (MDT) generado a partir de topografía detallada del proyecto (curvas de nivel cada 2 m). La pendiente media de las subcuencas se determinó a partir de la construcción del mapa de pendientes presentado en la Figura 51. Se observa que la pendiente media de las subcuencas varían entre un 23,4% y 50,3% como se presenta en la Tabla 28.

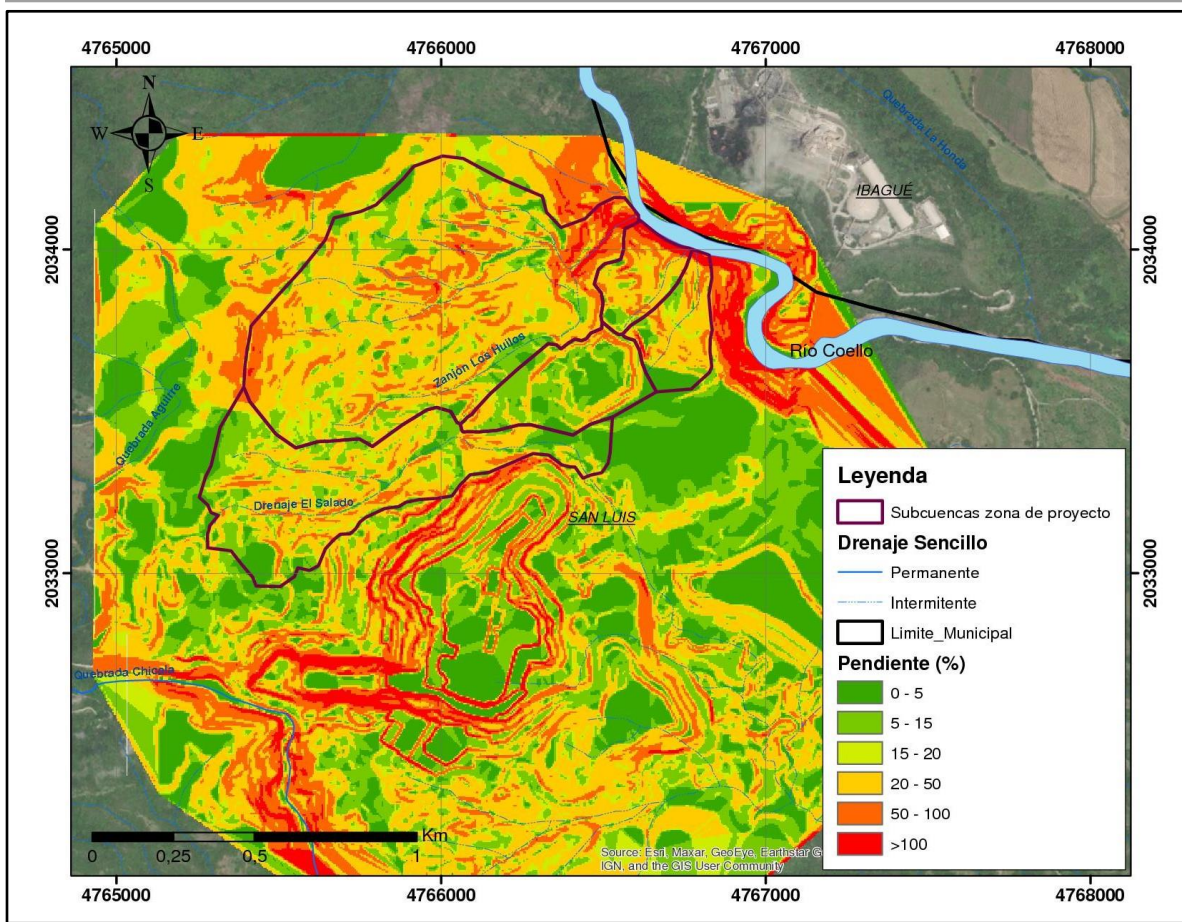


Figura 52. Mapa de pendiente en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Las características morfométricas para las cuencas analizadas se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28. Características morfométricas en las subcuencas de interés.

Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Orden	Longitud Cauce (km)	Pendiente Cauce (%)	Pendiente Cuenca (%)	Densidad de drenaje (km/km ²)	Coefficiente de compacidad	Tc (min)
Drenaje El Salado	0,32	3,5	2	1,35	5,4%	23,4	5,8	1,76	31
Zanjón Los Huilos	0,66	3,6	3	1,58	10,1%	34,5	6,849	1,24	31
Drenaje NN 1	0,07	1,2	1	0,36	13,1%	33,7	5,049	1,24	15
Drenaje NN 2	0,06	1	1	0,29	19,4%	50,3	4,884	1,18	15

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.4. Patrón de drenaje

Para identificar el patrón de drenaje de los cuerpos de agua existentes en la zona de estudio se estimó el índice de sinuosidad el cual se define como la relación entre la longitud total o de un tramo de cauce principal y la longitud en línea recta de ese mismo cauce o tramo de cauce estudiado. Según Morisawa, el índice de sinuosidad permite clasificar un río o tramo de río en rectilíneo, sinuoso, meandrizante, entrelazado o anastomosado, como se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Clasificación del índice de sinuosidad.

Rango	Descripción
< 1,05	Rectilíneo
1,05 – 1,50	Sinuoso
1,50 – 1,80	Meandrizante
1,80 – 2,00	Entrelazado
> 2	Anastomosado

Fuente: (Senciales González)

De acuerdo con esta clasificación y la definición del índice de sinuosidad, se determinaron las características para los cuerpos de agua principales que conforman la red de drenaje de interés como se presenta en la Tabla 30.

Tabla 30. Índice de sinuosidad estimado.

Cuenca	Índice de Sinuosidad	Clasificación
Drenaje. El Salado	1,18	Sinuoso
Zanjón Los Huilos	1,22	Sinuoso
Drenaje NN 1	1,06	Sinuoso
Drenaje NN 2	1,12	Sinuoso

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 30 el patrón de drenaje en las cuencas presentes en el área de estudio es sinuoso.

5.1.6.5. Caracterización de la precipitación

Las estaciones de precipitación se encuentran distribuidas espacialmente como se muestra en la Figura 52. Las coordenadas de localización de estas estaciones se encuentran en la Tabla 31, se observa que la estación La Resaca es la más representativa de las subcuencas de los drenajes localizados en la zona de estudio.

Tabla 31. Estaciones de precipitación empleadas.

Código	Nombre	Tipo	Depto	Norte	Este	Elevación	Periodo de registro
21210190	La Resaca	PG	TOLIMA	4761635	2030663	1250	1987-2019
21210200	Buenos Aires	PM	TOLIMA	4769975	2037345	728	1987-2019
21180210	Valle de San Juan	PM	TOLIMA	4765569	2021524	591	1972-2019
21215080	Chicoral	CO	TOLIMA	4778612	2025866	432	1963-2019
21245040	Apto Perales	SS	TOLIMA	4762681	2047206	943	1971-2019

Fuente: IDEAM.

Nota: CP: Climatológica Principal, CO: Climatológica Ordinaria, PM: Pluviométrica, SS: Sinóptica Secundaria.

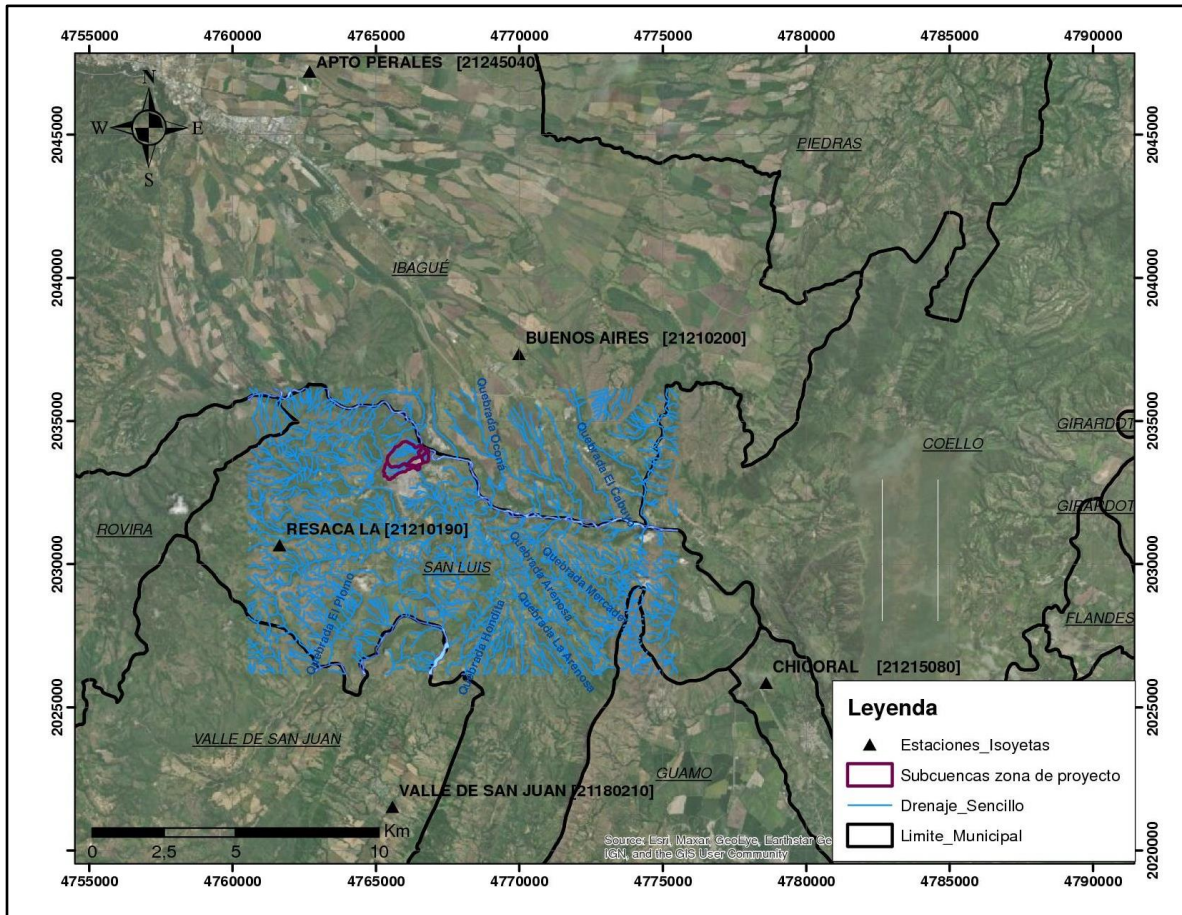


Figura 53. Localización de estaciones de precipitación.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.5.1. Análisis de consistencia y homogeneidad

A las series de precipitación, se les realizaron cuatro pruebas de normalidad con el objetivo de definir el conjunto de pruebas paramétricas o no paramétricas que evaluarán la consistencia y la homogeneidad de las series.

Para tal efecto se realizaron las pruebas de Shapiro Wilk, Kolmogorov Smirnov, Anderson Darling, Lillie y Shapiro Francia para un nivel de significancia del 5%. Se encontró que todas las estaciones analizadas se comportan bajo una distribución de probabilidad no paramétrica, es decir que no siguen una distribución normal (Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.012).

A partir de los resultados anteriores, se definieron las pruebas no-paramétricas a aplicar en las estaciones a fin de evaluar la homogeneidad y consistencia mediante pruebas de estabilidad en la media (Mann-Whitney y Kruskal-Wallis), estabilidad en la varianza (Siegel Turkey) y tendencia (Spearman y Kendall). Las pruebas utilizadas se describen en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.012.

Las pruebas fueron realizadas con ayuda del software RStudio para un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$. Se rechaza la hipótesis nula si el valor de p asociado al resultado observado es menor que el nivel de significación establecido. El p -

value nos muestra la probabilidad de haber obtenido el resultado que hemos hallado si se supone que la hipótesis nula es cierta. Los resultados para cada serie analizada se resumen en la Tabla 32.

Tabla 32. Resumen de pruebas estadísticas aplicadas a los registros de precipitación.

Estación	p-values				
	Sperman	Kendall	Siegel Turkey	Mann Whitney	Kruskall-Wallis
La Resaca	0,533	0,533	0,498	0,529	0,807
Buenos Aires	0,106	0,106	0,044	0,016	0,882
Valle de San Juan	0,564	0,565	0,149	0,194	0,300
Chicoral	0,740	0,741	0,254	0,596	0,186
Apto Perales	0,819	0,823	0,809	0,884	0,242

Fuente: Elaboración propia.

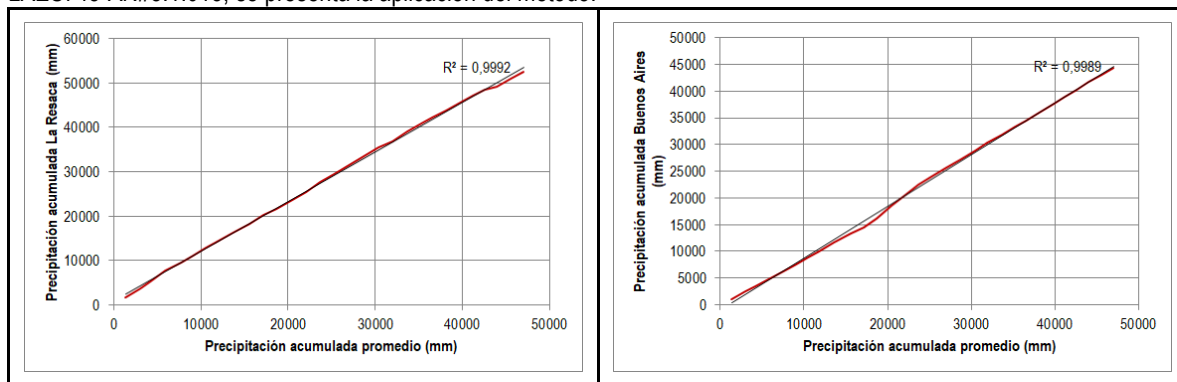
De acuerdo con lo anterior, se observa que los registros de las estaciones evaluadas presentan una buena calidad en los datos dado que en la Tabla 32 los p-values obtenidos son mayores a 0,05. Se concluye que los registros cumplen con las hipótesis de no tendencia, e igualdad en la media y la varianza en un 98%.

5.1.6.5.2. Curvas de doble masa de precipitación

El método de la curva de doble masa se basa en la hipótesis de proporcionalidad en la variación temporal de la acumulación de la variable en consideración. Por lo tanto, la variable acumulada en tiempos consecutivos en la estación de interés, contra la acumulación de los datos en otra u otras estaciones de referencia, en periodos contemporáneos de las series, debe representarse aproximadamente como una línea recta en un gráfico cartesiano (cada variable acumulada en uno de los ejes).

Un cambio en la pendiente en la curva de doble masa significa que hay un cambio en las magnitudes de la variable registrada en una de las estaciones, que no es detectado en otra estación. Estas anomalías pueden obedecer a cambios naturales y ser coherentes con la realidad u obedecer a cambios en los instrumentos o métodos de medición y no ser coherentes con la realidad.

Como resultado del mencionado análisis y a partir de las curvas presentadas en la Figura 53, se concluyó que en general las estaciones poseen registros consistentes por lo que no se realizó ajuste a los valores. En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.013, se presenta la aplicación del método.



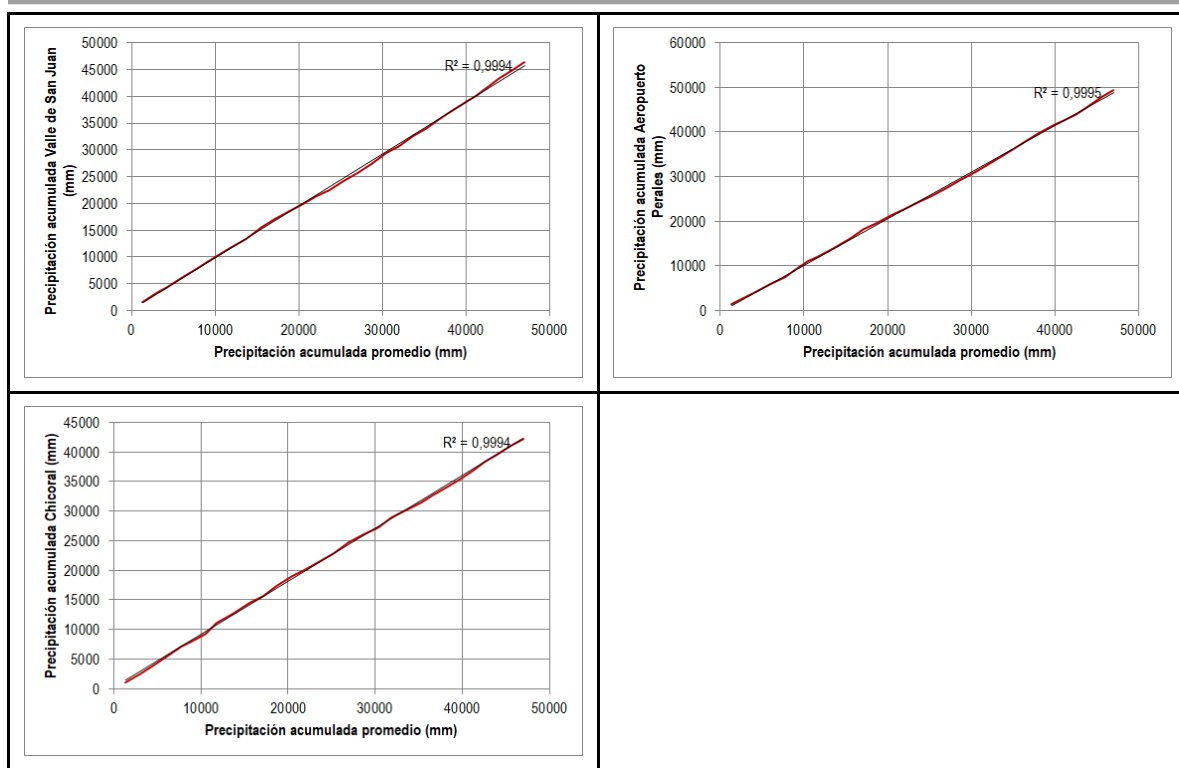


Figura 54. Curva de doble masa en estaciones de precipitación.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.5.3. Identificación de Outliers

Se aplicó la prueba no paramétrica denominada Test de Walsh en la identificación de outliers de precipitación y se eliminaron dichos valores de acuerdo con los resultados de la prueba.

Test de Walsh: Dentro del análisis exploratorio se pueden encontrar datos considerados como extremos anómalos, los cuales son definidos como outliers. Para determinar si estos datos son efectivamente consecuencia de errores en el proceso de medición, registros y/o manipulación de la información, estos pueden ser evaluados mediante el test de Walsh. Ésta consiste en una prueba no paramétrica desarrollada por Walsh para detectar datos anómalos (outliers) en un conjunto de datos. Este test requiere de una muestra con $n > 220$ para obtener un nivel de significancia del $\alpha = 0,05$, $n > 60$ para un nivel de significancia $\alpha = 0,10$.

Para la serie $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ que representa el conjunto de datos ordenados ascendentemente, se identifican los números de posibles outliers de acuerdo a la Ecuación 4.

$$c = \text{ceiling}(2\sqrt{2n}), k = r + c, b^2 = 1/\alpha, \alpha = \frac{1 + b\sqrt{(c - b^2)/(c - 1)}}{c - b^2 - 1}$$

Ecuación 4.

Donde *ceiling* representa el número entero superior más próximo.

1. Los r valores más pequeños son outliers con nivel de significancia α siempre y cuando se cumpla la Ecuación 5.

$$X_r - (1 + a)X_{r+1} + aX_k < 0$$

Ecuación 5.

2. Los r valores más grandes son outliers con nivel de significancia α siempre y cuando se cumpla la Ecuación 6.

$$X_{n+1-r} - (1 + a)X_{n-r} + aX_{n+1-k} > 0$$

Ecuación 6.

En el CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.012 se presentan los resultados del test de Walsh aplicados a las series de precipitación.

5.1.6.5.4. Complementación de vacíos

De la información disponible a nivel diario de las estaciones de precipitación identificadas en cercanías al área de influencia, se encontró que las estaciones presentaban vacíos de información en el periodo común de registro seleccionado (1990-2019) como se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33. Vacíos de información en estaciones de precipitación.

Estación	Vacíos (%)
La Resaca	10,8
Buenos Aires	0,2
Valle de San Juan	7,5
Chicoral	9,1
Apto Perales	1,6

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la complementación de la información a nivel diario desde el año 1991 hasta el año 2019 se utilizó el método propuesto por Monsalve (1995), el cual estima la precipitación de la estación a complementar a partir de las estaciones más cercanas como se presenta a continuación (Ver Ecuación 7).

$$P_x = 1/n[(N_x/N_1)P_1 + (N_x/N_2)P_2 + \dots + (N_x/N_n)P_n]$$

Ecuación 7.

Fuente: (Monsalve, 1995)

Donde:

P_x es la precipitación diaria a complementar en mm

P_1, P_2, P_n , es la precipitación conocida en las estaciones cercanas según el peso asignado en función de la distancia en mm

n : número de estaciones con registro de datos

N_x, N_1, \dots, N_n : Precipitación media anual multianual de las estaciones.

Con la anterior metodología se realizó la complementación de vacíos de las series de precipitación diaria a partir de los registros de las estaciones identificadas en la zona (Ver Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.013).

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Los parámetros estadísticos iniciales no presentan variaciones significativas respecto a los parámetros estadísticos obtenidos después de la complementación, la variación presentada entre la serie de precipitación diaria registrada y la serie complementada está entre 0,0% y 0,4% para la media y entre 0,1% y 2,5% para la desviación estándar, este último valor corresponde a la estación Sincelejo, que es la que presenta mayor cantidad de vacíos. (Véase Tabla 34 y Tabla 35).

Tabla 34. Variación en los parámetros estadísticos - Media diaria. Periodo 1990 - 2019.

Parámetro	La Resaca	Buenos Aires	Valle de San Juan	Chicoral	Apto Perales
Media de precipitación serie sin complementar (mm)	4,8	4,1	4,2	3,9	4,5
Media de precipitación serie complementada (mm)	4,8	4,1	4,2	3,9	4,5
Diferencia (%)	0,4	0,1	0,2	0,1	0,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Variación en los parámetros estadísticos - Desviación estándar. Periodo 1990 - 2019.

Parámetro	La Resaca	Buenos Aires	Valle de San Juan	Chicoral	Apto Perales
Desviación estándar serie sin complementar (mm)	12,2	11,7	12,1	11,5	10,3
Desviación estándar serie complementada (mm)	11,9	11,7	11,9	11,2	10,3
Diferencia (%)	2,5	0,1	2,0	2,4	0,4

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.5.5. Variabilidad temporal de la precipitación

Complementados los registros de precipitación de las estaciones analizadas se determinó la precipitación total promedio multianual para el periodo entre 1990 y 2019; con estos datos se construyeron las isoyetas a nivel mensual y anual para la zona de estudio. En la Tabla 36 se presentan los valores promedio de precipitación mensual multianual.

Tabla 36. Precipitación total mensual multianual en mm en las estaciones cercanas al sitio de estudio. Periodo 1990-2019.

Nombre	La Resaca	Buenos Aires	Valle de San Juan	Chicoral	Apto Perales
ENE	90	63	78	67	93
FEB	107	77	88	76	108
MAR	167	149	158	175	160
ABR	272	230	234	218	233
MAY	225	215	205	188	218
JUN	103	102	91	81	99
JUL	81	60	56	55	68
AGO	52	53	47	42	63
SEP	131	130	116	101	123
OCT	214	183	196	166	191

Nombre	La Resaca	Buenos Aires	Valle de San Juan	Chicoral	Apto Perales
NOV	186	133	165	142	174
DIC	123	84	113	99	116
ANUAL	1751	1480	1547	1410	1647

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 54 se observa que el régimen anual de lluvias presenta un comportamiento de tipo bimodal, siendo los periodos por encima del promedio de precipitación de marzo a mayo y entre octubre y noviembre, y los periodos de precipitaciones más bajas se presenta entre los meses de junio a septiembre y de diciembre a febrero. La estación La Resaca se considera la más representativa de la zona de estudio al encontrarse a 5,0 km de la zona de estudio.

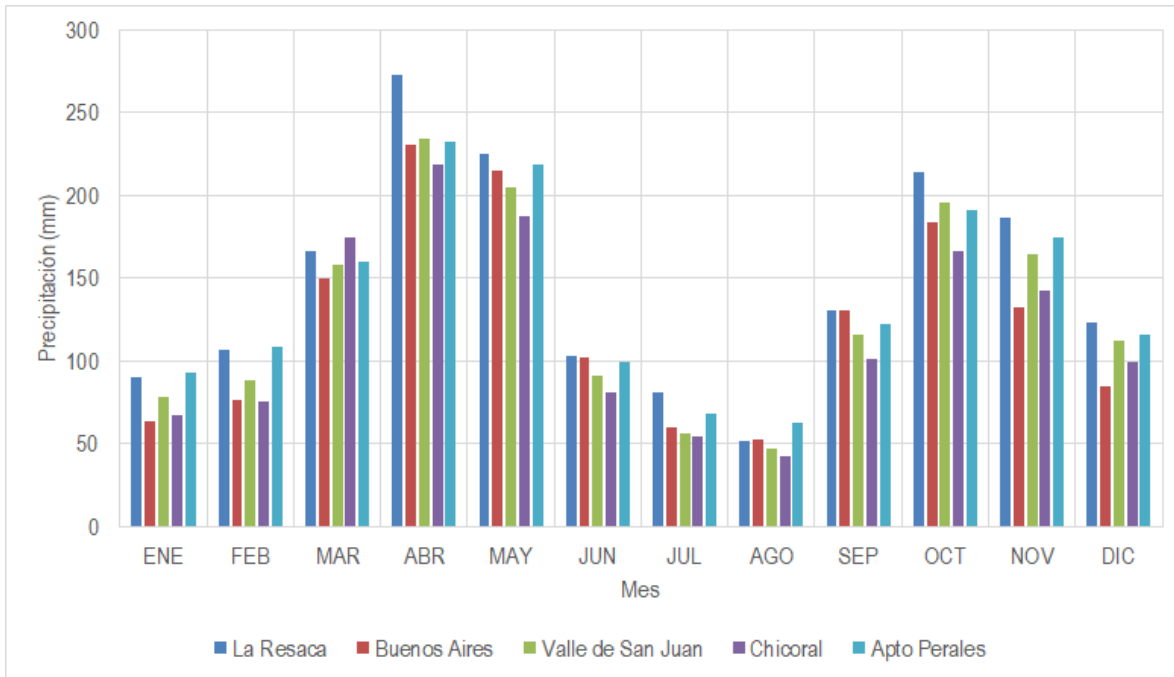


Figura 55. Distribución temporal de la precipitación total mensual en las estaciones analizadas.
Fuente: Elaboración propia.

La variación anual de la lluvia se analizó en la estación La Resaca (Ver Figura 55). La precipitación total anual mayor se presentó en el año 1993 y otro pico similar en el año 2004 y la precipitación más baja se presentó en el año 2017. Según la clasificación de Jan Null los años 1993 y 2004 son clasificados como neutro y Niño débil y el año 2017 como Niña débil, lo que indica que no hay influencia evidente de fenómenos ENSO. La media móvil para un periodo de 5 años deja ver una tendencia creciente desde el año 2001 hasta el año 2008 y posteriormente una tendencia al decrecimiento hasta el año 2019.

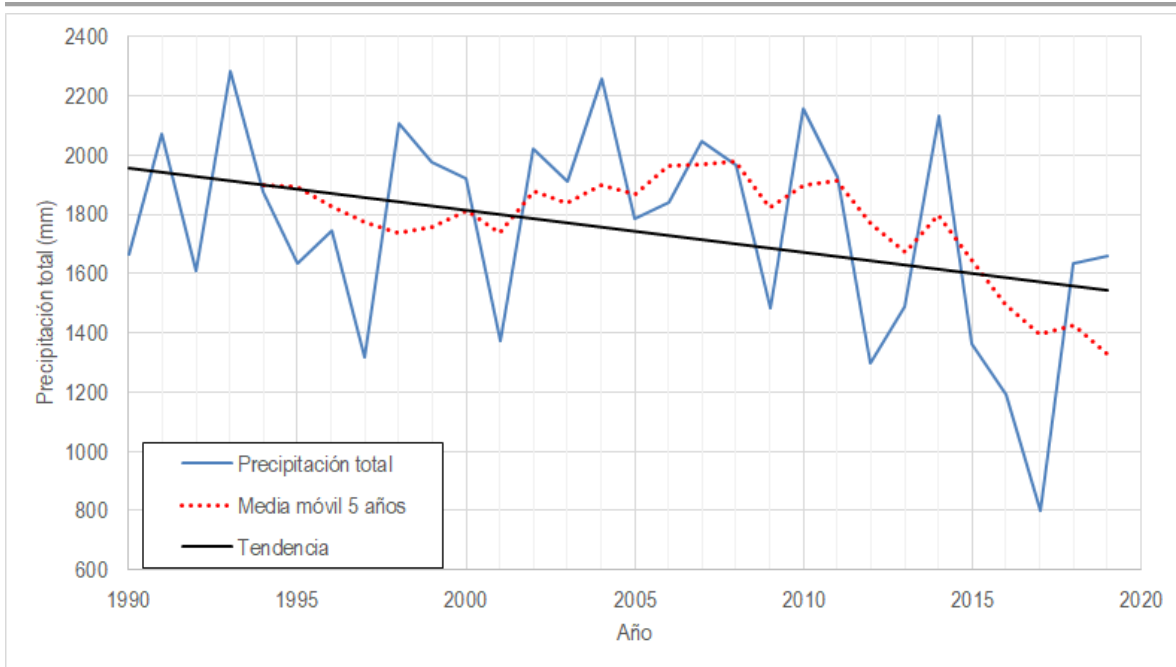


Figura 56. Variación anual de la precipitación en la estación La Resaca
Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.5.6. Variabilidad espacial de la precipitación

Se realizó la distribución espacial de la precipitación a nivel anual con el método de Kriging y el software Surfer a partir de los valores de precipitación total presentados en la Tabla 36, la distribución espacial se presenta en la Figura 56.

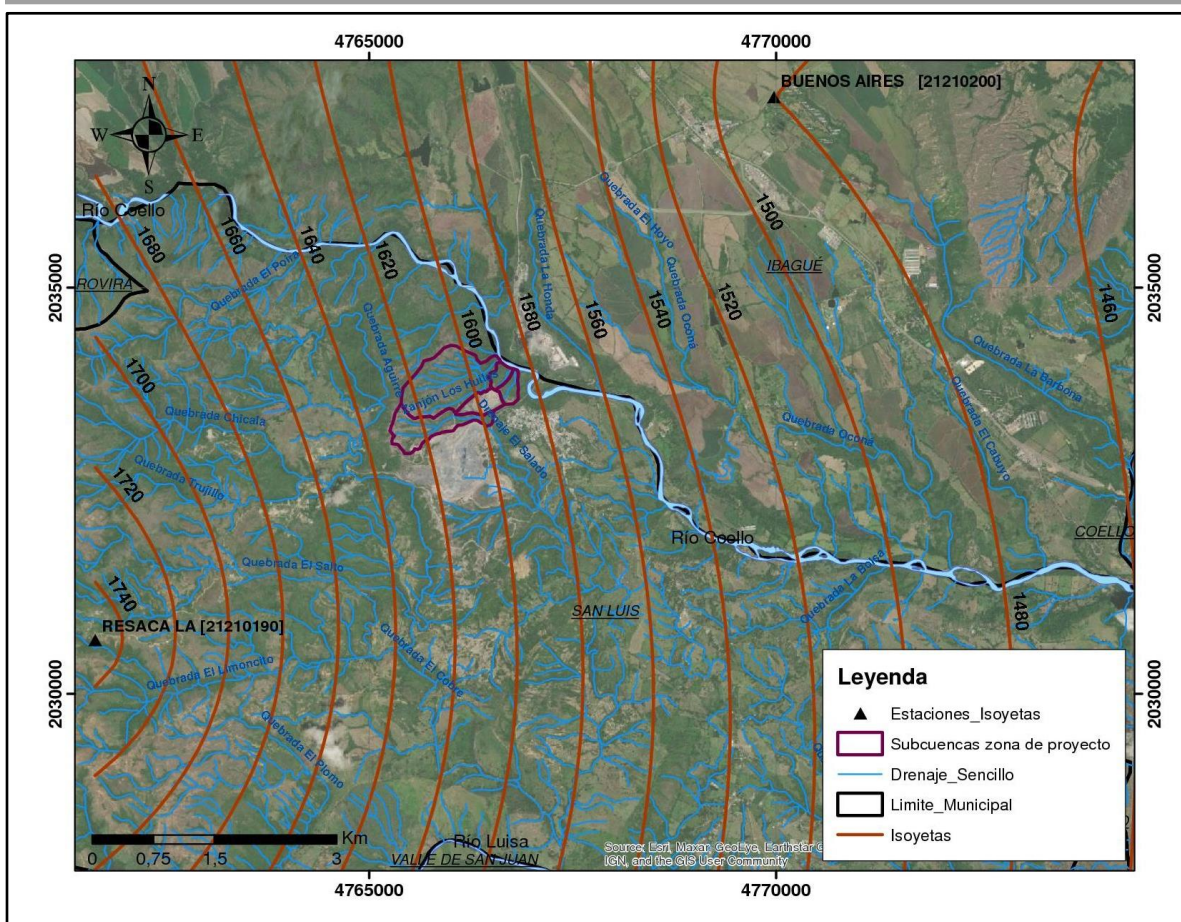


Figura 57. Distribución espacial de la precipitación total anual.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, en la zona de estudio la precipitación anual es del orden de 1600 mm.

5.1.6.5.7. Temperatura

Se analizaron los registros de temperatura en dos estaciones cercanas al área de influencia, encontrando que la temperatura se encuentra relacionada con la altitud a la cual se encuentran instaladas las estaciones de monitoreo. Se empleó el periodo 1977 – 2017 para definir a nivel anual la relación existente entre la temperatura y la elevación del terreno. En la Tabla 37 se presentan los promedios de temperatura mensual multianual para cada estación analizada.

Tabla 37. Temperatura media mensual multianual (°C) en las estaciones cercanas al área de influencia

Estación	Elevación (msnm)	T Media (°C)
Apto Perales	928	24,01
Chicoral	475	27,32

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 57 se presenta el comportamiento mensual promedio de la temperatura. La temperatura media más alta se registra en el mes de agosto y la temperatura media más baja en el mes de noviembre. La caracterización de temperaturas media, máxima y mínima en las estaciones analizadas se presenta en el numeral 5.1.8.1.

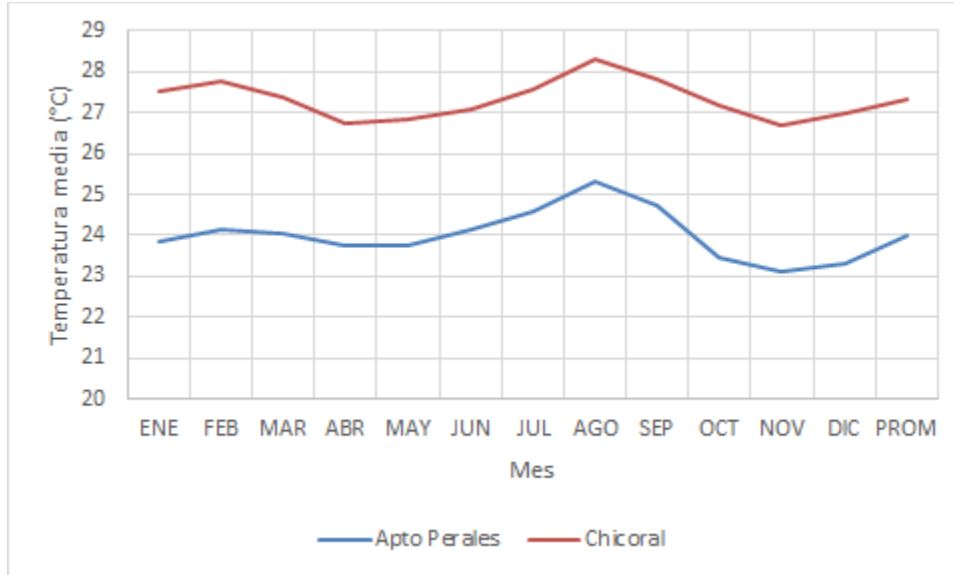


Figura 58. Variación mensual de la temperatura media en las estaciones analizadas.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 58 se presenta la relación encontrada a nivel anual con la cual se construyó el mapa de distribución espacial de la temperatura para la zona, en este caso el gradiente térmico calculado es del orden de $-0,007 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$. La distribución espacial se presenta en la Figura 59.

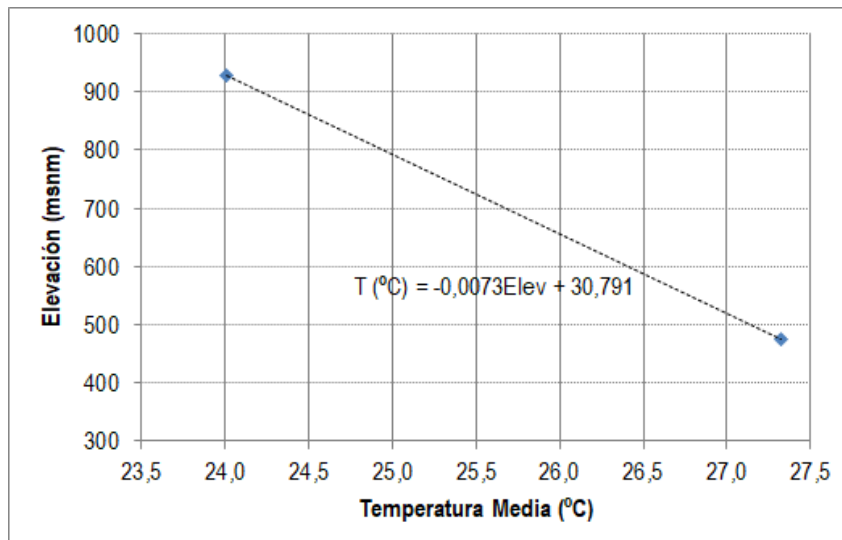


Figura 59. Relación entre la temperatura media anual y la elevación.
Fuente: Elaboración propia.

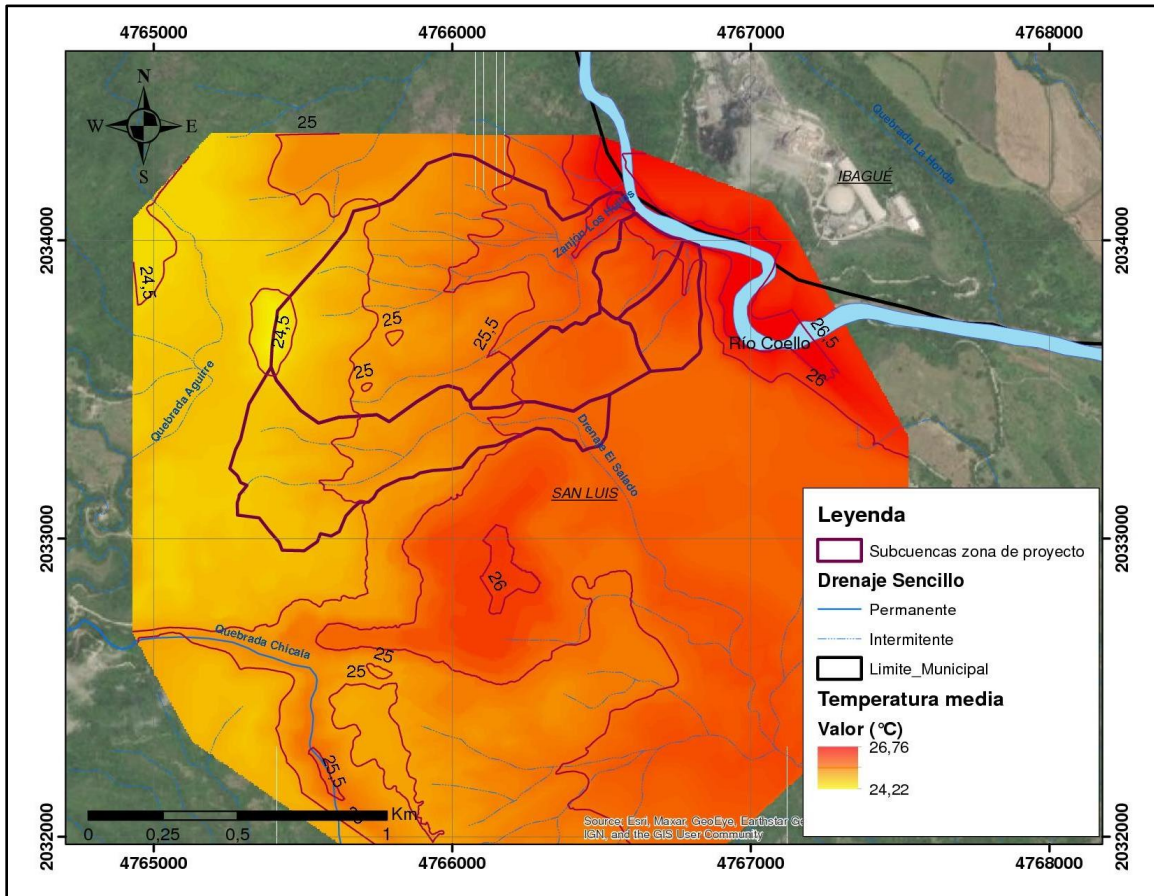


Figura 60. Distribución espacial de la temperatura media anual en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6. Caracterización hidrológica de los sistemas lóticos

Dentro del área de influencia no se identificaron estaciones hidrométricas que permitan realizar la caracterización de los drenajes identificados a partir de información directa de estos cuerpos de agua. En las cuencas principales (río Coello y río Luisa) sí se encontraron estaciones de caudales a partir de las cuales se pudo realizar calibración de un modelo hidrológico.

En la cuenca del río Coello se cuenta con la estación Payandé (21217070), que tiene un área de drenaje aproximado de 1529 km², mientras que en la cuenca del río Luisa se cuenta con las estaciones Cucunubá (código 2118703, área 322,8 km²) y Pavo Real (código 2118702, área 168,12 km²)

El cálculo de los caudales medios se basó en los resultados obtenidos de la aplicación del modelo IHACRES. El modelo IHACRES fue seleccionado para generar la serie diaria de caudales medios para un periodo de 30 años a partir de los cuales se realizó la estimación del caudal medio mediante la construcción del histograma mensual. Su calibración se realizó en la cuenca intermedia del río Luisa, entre las estaciones Cucunubá y Pavo Real.

5.1.6.6.1. Caudales medios

El modelo IHACRES, el cual fue seleccionado dada su representatividad de las condiciones hidrológicas del área, es un modelo lluvia – escorrentía de carácter conceptual de tipo agregado desarrollado en lenguaje Java, implementado por el Centro de Hidrología y Ecología del Reino Unido y la Universidad Nacional de Australia. Se ha aplicado con éxito en cuencas hidrográficas con áreas entre 1 y 100 000 km². En Colombia este software actualmente hace parte de la Caja de herramientas de hidrología para POMCAS desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia y la UNESCO (<https://sites.google.com/site/hydrotoolbox/herramientas/modelos-de-balance-hidrico>), la cual incorpora metodologías para la formulación de planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas.

Este modelo incorpora un modelo no lineal para la estimación de la precipitación efectiva y un modelo lineal autoregresivo para la transformación de la precipitación efectiva en escorrentía directa, basado en un hidrograma unitario instantáneo.

A continuación, se presentan los modelos matemáticos incorporados en el software:

Modelo Lineal (cálculo de escorrentía directa)

$$y_t = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \mu_t + \bar{\xi}_t$$

Ecuación 8.

Donde:

y_t : Caudales observados

$\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}$: Función de transferencia

μ_t : Precipitación efectiva calculada en el modelo no lineal

$\bar{\xi}_t$: Error o incertidumbre

Modelo No Lineal (cálculo de precipitación efectiva)

$$\mu_k = [C(\phi_k - I)]^\rho P_k$$

Ecuación 9.

$$\phi_k = P_k + (1 - \frac{1}{\tau_k})\phi_{k-1}$$

Ecuación 10.

$$\tau_k = \tau_w \exp(0.062f(T_r - T_k))$$

Ecuación 11.

Donde:

μ_k : Precipitación efectiva

P_k : Precipitación

C: Constante de masa*

ϕ_k : Índice de humedad del suelo

I: Umbral de índice de humedad o umbral de flujo para la producción de escorrentía*

ρ : Parámetro de no linealidad o potencia de la humedad del suelo*

τ_k :	Tasa de secado del suelo
τ_w :	Tasa de referencia de secado*
f :	Factor de módulo de temperatura*
T_r :	Temperatura de referencia*
T_k :	Temperatura observada

(Nota: * corresponden a los parámetros calibrados por el modelo)

Cuando los valores de evapotranspiración son incorporados como serie de tiempo en el modelo, se obvia el uso del factor de temperatura y la temperatura de referencia. Para el desarrollo de los trabajos se ha dado preferencia a dicha metodología en lugar de utilizar el método de cálculo de evapotranspiración incorporado por defecto en el modelo con el propósito de evitar inconsistencias debidas al uso de distintas metodologías.

Resumen de parámetros a ser calibrados

Generalmente se calibran con el modelo IHACRES seis parámetros, presentados a continuación:

- C: Término de balance de masa, calibrado automáticamente por el modelo
- f: Factor de modulación de la temperatura, el cual tiene en cuenta las fluctuaciones de la evaporación
- T_{ref} : Temperatura de referencia, usualmente constante
- τ_w : Valor de la constante de tiempo a la temperatura de referencia
- l: Umbral de flujo para la producción de escorrentía (muy importante en una corriente efímera)
- ρ : Potencia de la humedad del suelo

Datos de entrada requeridos por el modelo IHACRES

- Área de la cuenca (opcional, depende de las unidades en las que se especifique Q)
- Datos diarios, horarios o subhorarios de precipitación (P), caudal observado (Qo) y temperatura (T) o evapotranspiración potencial (ETP).

Calibración

El proceso de calibración para el modelo se realizó tomando como referencia los caudales diarios de la cuenca intermedia entre las estaciones Pavo Real y Cucunubá, por ser cercana a la zona de estudio y tener área de drenaje menor a la estación sobre el río Coello. Las memorias de calibración se presentan en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.014.

Se calibró el modelo para el periodo 1990-1994 y se tomó el año 1990 de “calentamiento”, el cual es un periodo que permite disminuir el sesgo de las condiciones iniciales en los resultados del modelo.

Medidas de bondad de ajuste

Las medidas de bondad de ajuste de RSME y Nash-Sutcliffe. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

El criterio de Nash-Sutcliffe mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, E=1; si se intenta ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Ecuación 12.

Donde:

Q_{sim} : Caudal simulado

Q_i : Caudal observado

La clasificación del criterio se presenta a continuación: (Ver Tabla 38).

Tabla 38. Valores Referenciales del Criterio de Nash - Sutcliffe

Nash - Sutcliffe	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2-0,4	Satisfactorio
0,4-0,6	Bueno
0,6-0,8	Muy Bueno
> 0,8	Excelente

Fuente: Elaboración propia.

Raíz del Error Cuadrático Medio (RSME)

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados, está definido mediante la siguiente expresión:

$$\sqrt{\frac{1}{n} * \sum (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}$$

Ecuación 13.

Donde:

Q_i^{sim} : Caudal simulado

Q_i^{obs} : Caudal observado

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Nash-Sutcliffe: 0,343 (Según la clasificación anterior corresponden a satisfactorio).

Raíz del Error: 3,39 m³/s

Parámetros resultantes

Como resultado de la calibración realizada los valores resultantes de los parámetros corresponden a los presentados en la Tabla 39.

Tabla 39. Parámetros Calibrados

Parámetro	Valor
c: Término de balance de masa, calibrado automáticamente por el modelo	0,000374
f: Factor de modulación de la temperatura, el cual tiene en cuenta las fluctuaciones de la evaporación	1,70
Tref: Temperatura de referencia	20,0
l: Umbral de flujo para la producción de escorrentía (muy importante en una corriente efímera)	0,0
p: Potencia de la humedad del suelo	0,900

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Parámetro	Valor
tw: Valor de la constante de tiempo a la temperatura de referencia	20,0

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 60 se presenta el histograma de caudales observados y caudales simulados, donde se ve que en los primeros meses no hay un ajuste adecuado, teniendo en cuenta que el primer año se seleccionó como de calentamiento.

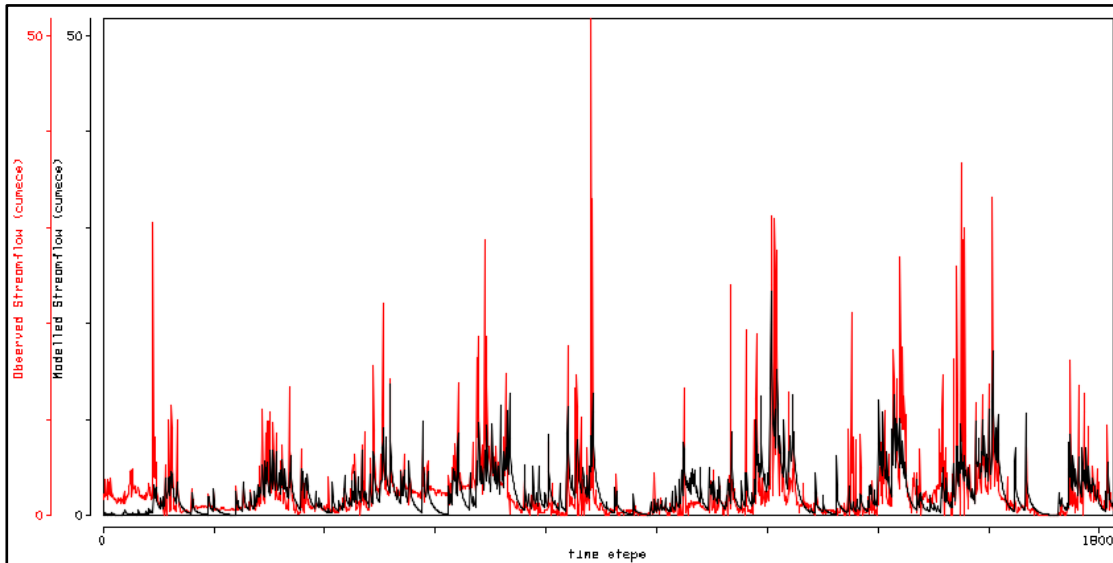


Figura 61. Comparación de caudales observados (línea roja) y simulados (línea negra) en el periodo de calibración del modelo IHACRES

Fuente: Elaboración propia.

Comparación de curva de duración de caudales

Teniendo en cuenta los parámetros seleccionados, las series de caudales medios diarios registrados y la serie de caudales diarios simulados, se elaboraron las curvas de duración de caudales para el periodo de calibración. El resultado se presenta en la Figura 61 a continuación:

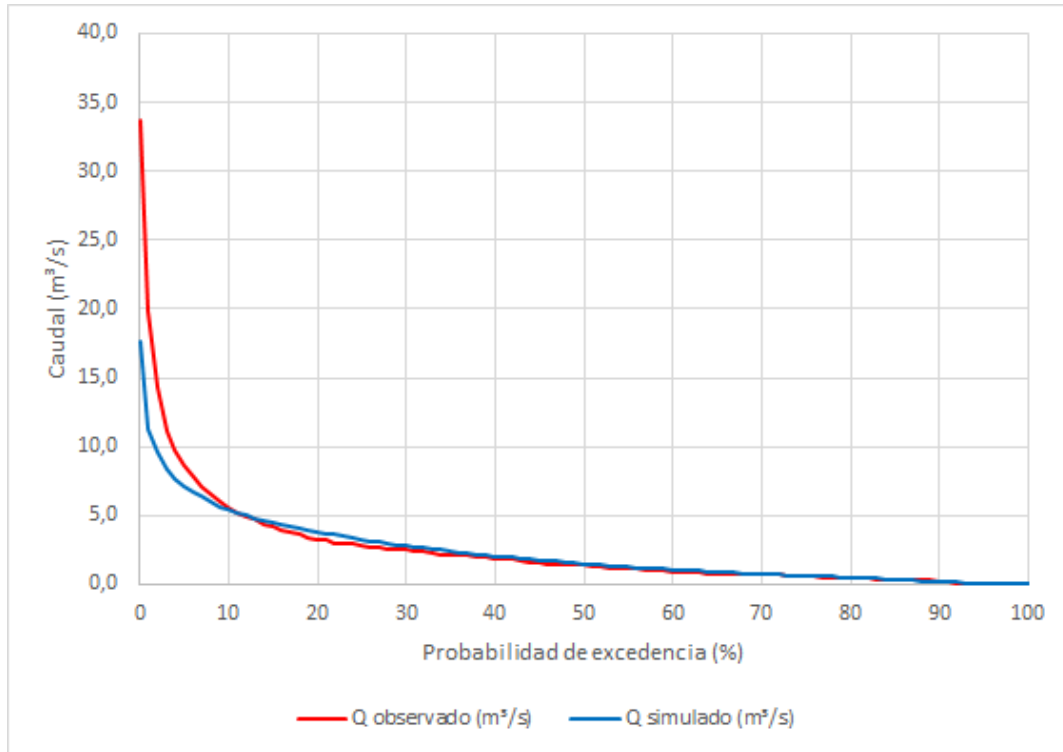


Figura 62. Curva de duración de caudales Simulados vs Registrados Periodos de Calibración 1990-1994
Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse que existe representatividad de los caudales simulados respecto a los registrados en la cuenca intermedia del río Luisa, y las diferencias observadas se presentan en los valores más altos de caudales.

Validación

Para la validación del modelo se tomó el periodo correspondientes a 1997-2000. Las memorias de validación se presentan en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.014.

Los valores de bondad de ajuste para este periodo se presentan a continuación:

Nash-Sutcliffe: (0,21 Según la clasificación anterior corresponde a satisfactorio, dentro del límite).

Raíz del Error Cuadrático Medio: 4,5 m³/s

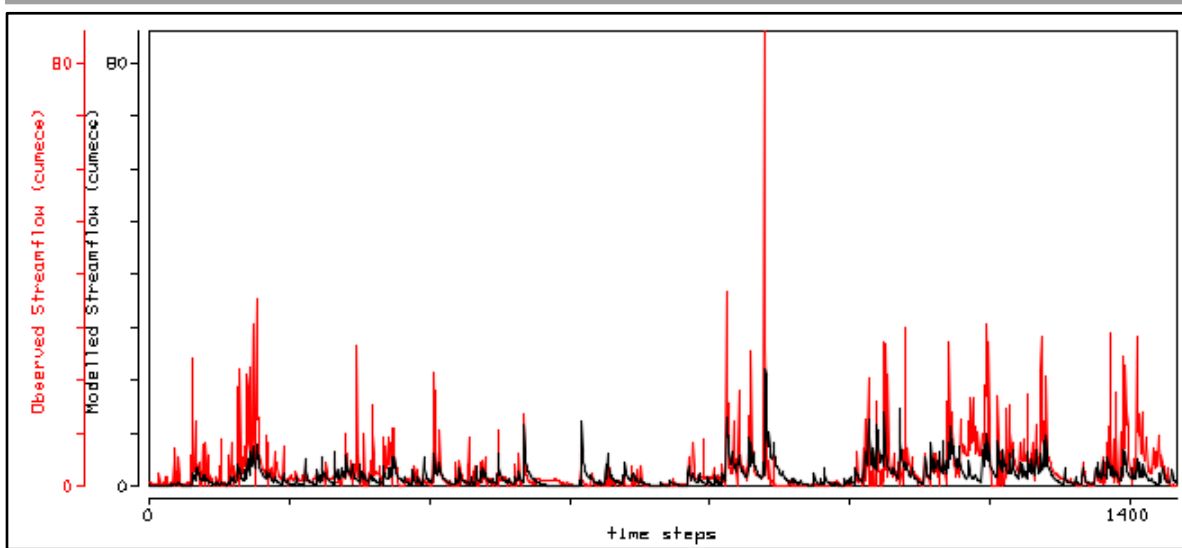


Figura 63. Comparación de caudal observado y simulado en periodo de validación

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la curva de duración de caudales para el periodo validado, obteniendo que el comportamiento de los valores registrados supera los registrados por la estación:

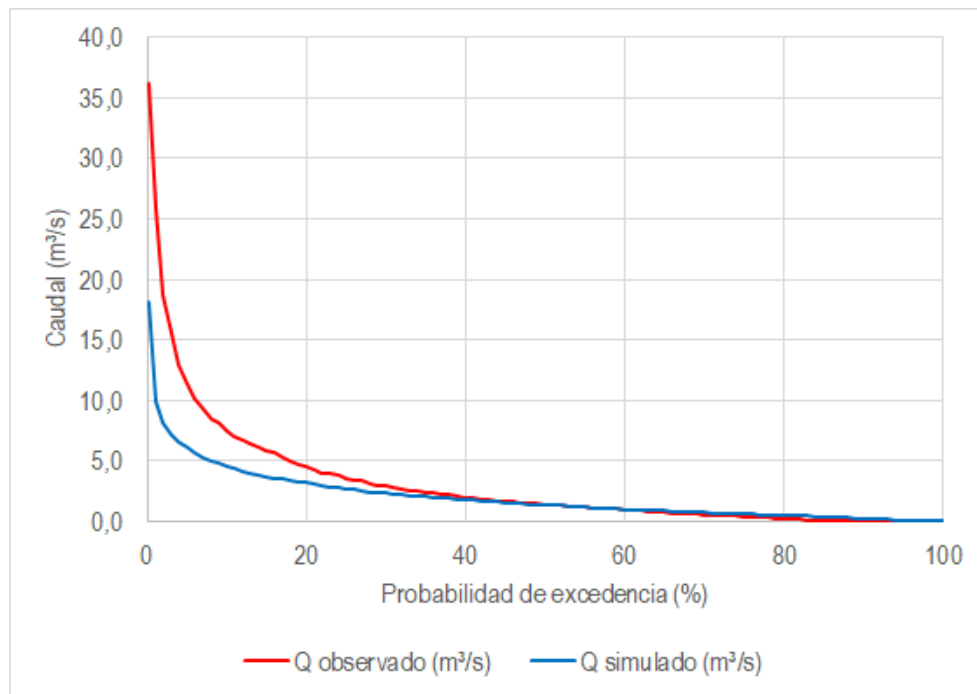


Figura 64. Curva de Duración de Caudales Simulados vs Registrados Periodo de Validación 1996-1999.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.2. Caudales en los cuerpos de agua de interés

La simulación con el modelo calibrado IHACRES se realizó para las subcuencas de interés para el periodo 1990-2019. En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.015 se presentan los resultados de la simulación hidrológica para las subcuencas de interés. En la Tabla 40 se presentan los caudales medios estimados para el periodo simulado.

Tabla 40. Resultados del Modelo IHACRES

ID	Subcuenca	Caudal (l/s)
1	Zanjón Los Huilos	7,77
2	Drenaje NN 1	0,81
3	Drenaje NN 2	0,67
4	Drenaje El Salado	3,80

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 64 el régimen de caudales de los drenajes es de tipo bimodal. Los periodos de caudales por encima del promedio ocurren de abril a junio y de octubre a noviembre, siendo el mes de mayo el que presenta mayor caudal. El periodo de caudales bajos se presenta en los meses restantes (julio-septiembre y diciembre-marzo), donde el mes de agosto presenta el caudal mensual multianual más bajo. El caudal presentado en cada mes y el caudal promedio estimado en cada subcuenca se relacionan en la Tabla 41.

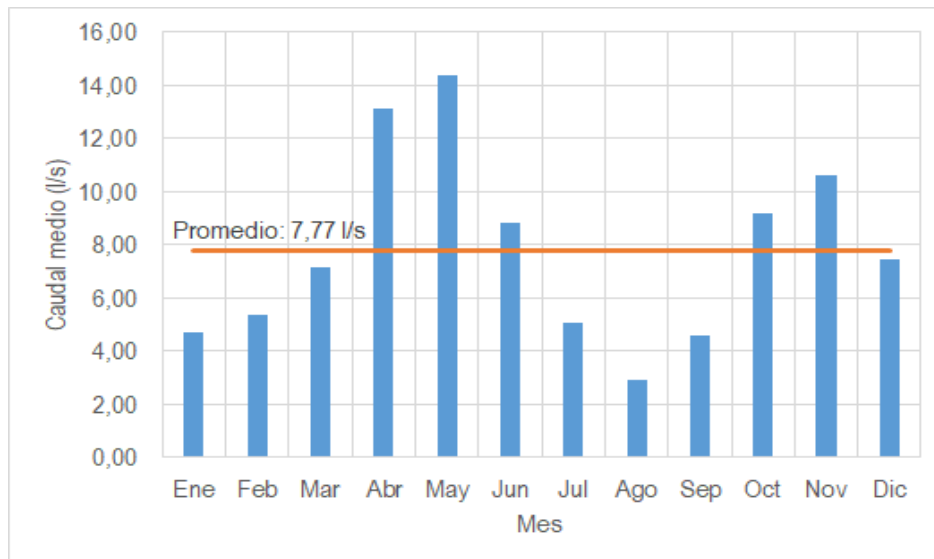


Figura 65. Distribución temporal de caudales medios mensuales en el Zanjón Los Huilos. Periodo 1990-2019.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Caudal medio mensual multianual en l/s en los cuerpos de agua identificados. Periodo 1990-2019.

Cuerpo de agua	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Zanjón Los Huilos	4,73	5,38	7,13	13,13	14,37	8,79	5,04	2,93	4,61	9,16	10,60	7,42	7,77
Drenaje NN 1	0,49	0,56	0,74	1,36	1,49	0,91	0,52	0,30	0,48	0,95	1,10	0,77	0,81
Drenaje NN 2	0,41	0,46	0,61	1,13	1,24	0,76	0,43	0,25	0,40	0,79	0,91	0,64	0,67
Drenaje El Salado	2,31	2,63	3,48	6,41	7,02	4,29	2,46	1,43	2,25	4,47	5,18	3,62	3,80

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.2.1. *Análisis de tendencia*

Con el fin de establecer los ciclos de años húmedos y secos, se realizó un análisis sobre la evolución en el tiempo del caudal medio anual para los drenajes. En la Figura 65 se muestra dicha variación en el Zanjón Los Huilos utilizando una media móvil para períodos de cinco años.

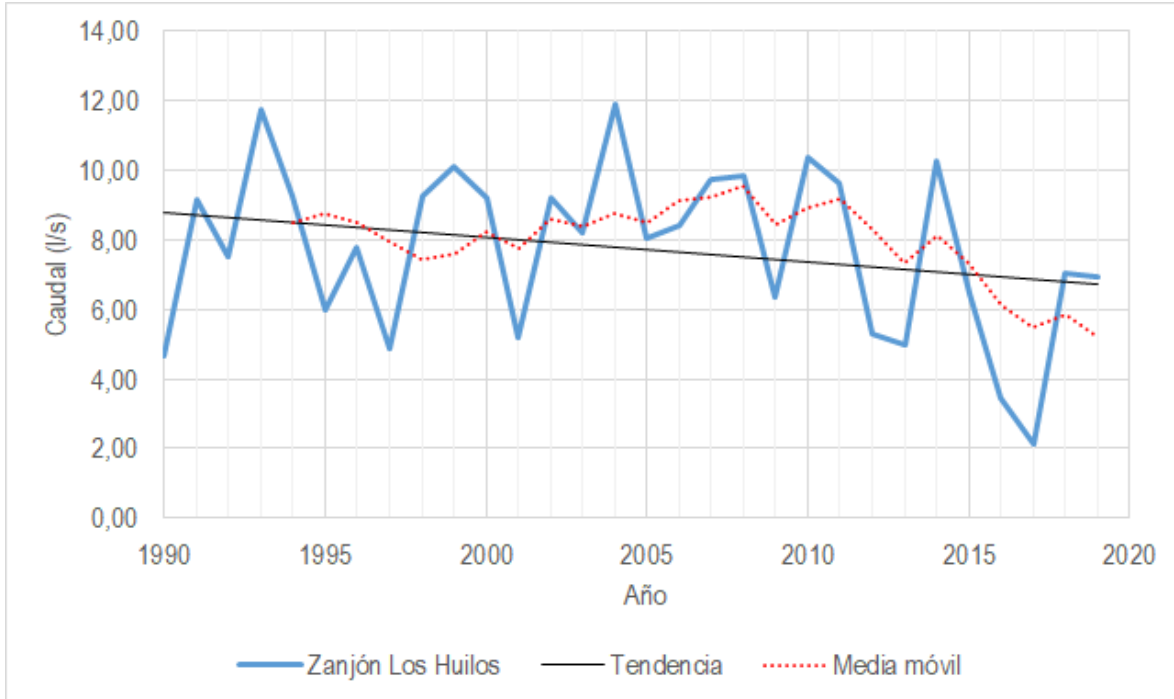


Figura 66. Variación de caudales medios anuales en el Zanjón Los Huilos.

Fuente: Elaboración propia.

El caudal medio anual mayor se presentó en el año 2004, otro pico similar en el año 1993 y el valor anual más bajo se presentó en el año 2017. Según la clasificación de Jan Null los años 1993 y 2004 son clasificados como neutro y Niño débil y el año 2017 como Niña débil, lo que indica que no hay influencia evidente de fenómenos ENSO. La media móvil para un periodo de 5 años deja ver una tendencia creciente desde el año 2001 hasta el año 2008 y posteriormente una tendencia al decrecimiento hasta el año 2019.

Tomando como referencia los dos picos más altos de caudales (1993 y 2004) se podría concluir preliminarmente que la ciclicidad a largo plazo es de 11 años. Para validar totalmente esta afirmación se deben tener más años de registro.

5.1.6.6.2.2. *Curva de duración de caudales*

A partir de la serie de caudales a nivel diario se elaboró la curva de duración de caudales medios diarios en los drenajes identificados la cual permite establecer la probabilidad de que un valor de caudal sea igualado o excedido.

En la Figura 66 se presenta como ejemplo la curva de duración de caudales del Zanjón Los Huilos, donde se observa que la curva presenta una fuerte pendiente lo que indica que el arroyo presenta caudales extremos (altos y bajos)

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

frecuentemente, como sucede en un cauce de tipo intermitente, al contrario de una curva que tiende a ser plana lo cual que indica un río es autorregulado y presenta baja frecuencia de caudales muy altos o muy bajos. En la Tabla 42 se presentan los caudales esperados a diferentes confiabilidades para los drenajes identificados en la zona de estudio (Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.015).

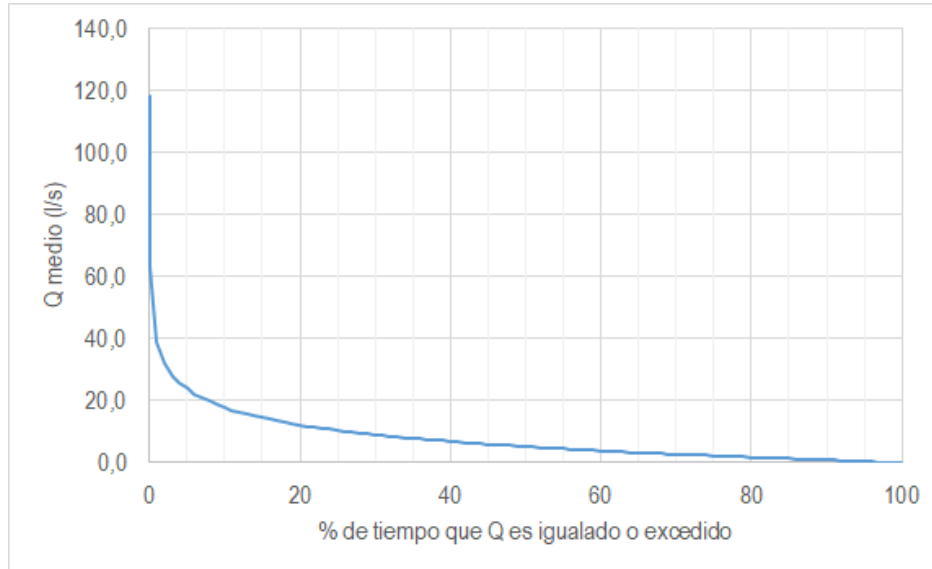


Figura 67. Curva de duración de caudales diarios. Zanjón Los Huilos.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42. Caudales esperados en los arroyos analizados para diferentes confiabilidades en l/s.

Percentil de excedencia	Zanjón Los Huilos	Drenaje NN 1	Drenaje NN 2	Drenaje el Salado
0	118,6	12,3	10,2	57,9
10	17,9	1,9	1,5	8,7
20	12,1	1,3	1,0	5,9
30	9,1	0,9	0,8	4,4
40	6,9	0,7	0,6	3,4
50	5,2	0,5	0,4	2,5
60	3,8	0,4	0,3	1,9
70	2,7	0,3	0,2	1,3
80	1,8	0,2	0,2	0,9
90	0,8	0,1	0,1	0,4
100	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.2.3. Balance hídrico

Para el análisis de balance hídrico se tuvieron en cuenta los caudales estimados para las subcuencas en el área de influencia del proyecto. Se utilizaron las características climatológicas de la estación Aeropuerto Perales, al estar instalada a 943 msnm cercana a la elevación promedio de las cuencas estudiadas (727 msnm), la precipitación se definió de acuerdo con las isoyetas elaboradas para la zona de estudio. Con el balance se determinó la infiltración y la evapotranspiración real a nivel mensual, este método se basa en el principio de continuidad el cual se resume mediante la Ecuación 14.

$$Entradas = Salidas + Almacenamiento$$

Ecuación 14.

Fuente: (Monsalve, 1995)

Donde en forma general las entradas corresponden a la precipitación (P) total media de la cuenca; las salidas corresponden a la combinación de la evaporación y la transpiración de las plantas, denominada evapotranspiración (ET), y a la escorrentía superficial (E); el almacenamiento corresponde al volumen de agua almacenado en las diferentes capas del subsuelo (S). Teniendo en cuenta las anteriores definiciones la formulación replanteada del balance hídrico, es como se muestra en la Ecuación 15, la cual se representa esquemáticamente en la Figura 67

$$P = ET + ES + S$$

Ecuación 15.

Fuente: (Monsalve, 1995)

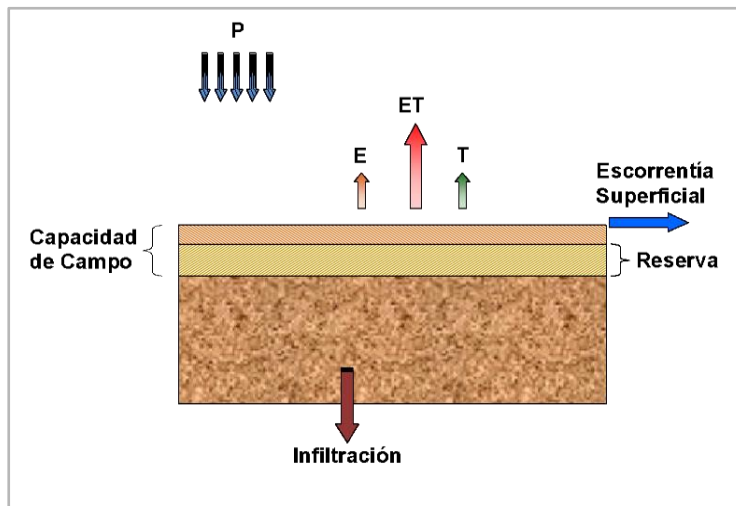


Figura 68. Esquema conceptual del balance hídrico.

Fuente: Elaboración propia.

El balance hídrico se realizó por el método directo, el cual supone que el agua precipitada es almacenada en el suelo y se va perdiendo mes a mes hasta agotar la reserva para poder cubrir las necesidades de agua (evapotranspiración) y adicionalmente generar escorrentía superficial en los meses secos. Dicho balance consiste en definir a nivel mensual los siguientes parámetros (en mm).

5.1.6.6.2.4. Precipitación media mensual (P)

Se utilizaron los registros mensuales de precipitación obtenidos para las subcuencas en estudio, los cuales se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43. Precipitación mensual multianual en las subcuencas.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Zanjón Los Huilos	83,6	99,1	153,4	251,3	207,5	95,0	75,0	47,4	120,4	196,7	173,2	114,7	1617
Drenaje NN 1	82,6	97,9	151,5	248,3	205,0	93,9	74,1	46,8	118,9	194,3	171,1	113,3	1598
Drenaje NN 2	82,7	98,0	151,7	248,6	205,2	94,0	74,2	46,9	119,0	194,6	171,3	113,4	1600
Drenaje El Salado	84,1	99,7	154,3	252,9	208,8	95,6	75,5	47,7	121,1	197,9	174,2	115,4	1627

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.2.5. Evapotranspiración potencial (ETP)

Para determinar el comportamiento de la evapotranspiración potencial o la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación que se desarrolla en óptimas condiciones, se calculó la Evapotranspiración Potencial mediante el método de Thornthwaite, Penman- Monteith y de Tanque Evaporímetro propuesto por la FAO.

- Metodología de Thornthwaite

Relaciona la evapotranspiración potencial con la temperatura media mensual multianual, y realiza una corrección en función de la duración astronómica del día dependiendo de la latitud y del número de días de cada mes, los resultados se presentan en la Tabla 44.

A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo:

- Se calcula el índice de calor mensual (i) a partir de la temperatura media mensual de acuerdo con la Ecuación 16.

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

Ecuación 16.

Fuente: (Monsalve, 1995)

Donde:

i es el índice de calor mensual
T es la temperatura media mensual en °C

- Se calcula el índice de calor anual (I) como la suma de los 12 valores de (i).
- Se calcula la ETP mensual sin corregir mediante la Ecuación 17.

$$ETP_{sin\ corregir} = 16 \left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

Ecuación 17.

Fuente: (Monsalve, 1995)

Donde:

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

ETP sin corregir es la evapotranspiración mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol.
 T es la temperatura media mensual en °C
 I es el índice de calor anual
 - El coeficiente α se calcula mediante la Ecuación 18.

$$\alpha = 6,75E - 07 * I^3 - 7,71E - 05 * I^2 + 1,79E - 02 * I + 0,49$$

Ecuación 18.

Fuente: (Monsalve, 1995)

Donde:

I es el índice de calor anual

- Se realiza la corrección para el número de días del mes (d) y número de horas de sol (N) como se presenta en la Ecuación 19.

$$ETP = ETP_{sin\ corregir} \times \frac{N}{12} \times \frac{d}{30}$$

Ecuación 19.

Fuente: (Monsalve, 1995)

Donde:

ETP sin corregir es la evapotranspiración mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol.
 ETP es la evapotranspiración mensual en mm/mes corregida
 N es el número de días en el mes
 d es el número de horas de sol en el día

Tabla 44. Evapotranspiración potencial (método de Thornthwaite).

Parámetro	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total
Temperatura	23,8	24,2	24,0	23,8	23,8	24,2	24,6	25,3	24,7	23,5	23,1	23,3	
Índice de calor	10,64	10,86	10,77	10,59	10,60	10,86	11,14	11,64	11,25	10,39	10,14	10,29	129,2
Coeficiente a	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
ETP	99,1	103,0	101,5	98,1	98,3	103,1	108,4	118,3	110,5	94,5	90,1	92,7	
n° días mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
n° horas luz	11,8	11,9	12	12,1	12,2	12,2	12,2	12,1	12	11,9	11,8	11,8	
ETP corregida	100,7	95,4	104,9	98,9	103,3	104,8	113,9	123,2	110,5	96,9	88,6	94,2	1235,3

Fuente: Elaboración propia.

- Metodología del tanque evaporímetro

Utiliza la evaporación registrada en el tanque evaporímetro y la afecta por un coeficiente K_p , que depende de la velocidad del viento, la distancia al cultivo y la humedad relativa. El coeficiente del tanque evaporímetro se definió bajo las ecuaciones presentadas en la Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (FAO, 2006). Esta metodología está definida bajo la Ecuación 20.

$$ET_o = K_p * E_{pan}$$

Ecuación 20.

Fuente: (FAO, 2006)

Donde:

ETo es la evapotranspiración de referencia en mm/mes
 Kp es el coeficiente del tanque evaporímetro
 Epan es la evaporación del tanque evaporímetro mm/mes

$$Kp = 0,108 - 0,0286u + 0,0422\ln(\text{Borde}) + 0,1434\ln(HR) - 0,000631[\ln(\text{Borde})]^2\ln(HR)$$

Ecuación 21.

Fuente: (FAO, 2006)

Donde:

Kp es el coeficiente del tanque evaporímetro
 u es la velocidad media del viento en m/s y debe estar entre 1,0 m/s y 8,0 m/s.
 Borde es la distancia al borde de la superficie identificada (Predominancia de pasto) el cual debe estar entre 1 m y 1000 m.
 HR es la humedad relativa media expresada en porcentaje.

Para la zona de estudio se tuvieron en cuenta los registros de la estación Aeropuerto Rafael Barvo la cual indica que la humedad relativa es de 76,8% y la velocidad del viento de 2,04 ms. Se supone que el tanque se localiza a una distancia de barbecho a barlovento entre 1 y 10 m, siendo el coeficiente de 0,75.

La evaporación mensual registrada en la estación Aeropuerto Perales se multiplicó por el coeficiente del tanque evaporímetro para obtener los valores de evapotranspiración potencial mensual. Los resultados se presentan en la Tabla 45.

Tabla 45. Evapotranspiración potencial en mm (método de Tanque evaporímetro).

Parámetro	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
E (mm)	125,6	122,3	123,2	118	123,2	131,4	158,2	173,9	150,1	128,5	104,4	113,6	1572,5
ETP (mm)	94,21	91,7	92,43	88,51	92,4	98,54	118,7	130,4	112,5	96,4	78,34	85,19	1179,4

Fuente: Elaboración propia.

- Metodología de Penman- Monteith

La metodología de Penman involucra dos componentes: uno que estima la cantidad de radiación disponible para evaporación mediante un balance energético aproximado, y el segundo que aplica la ecuación de Dalton para la estimación de la evaporación como función del déficit de humedad atmosférico y de la velocidad del viento. Este método utiliza los parámetros de temperatura mínima y máxima, humedad relativa, brillo solar (los cuales se tomaron de la estación Aeropuerto Perales) y velocidad del viento. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial por esta metodología, se utilizó el software CROPWAT 8.0, desarrollado por la FAO, cuyos resultados se muestran en la Tabla 46.

Tabla 46. Evapotranspiración potencial en mm (Método de Penman-Monteith).

Mes	T. mín (°C)	T. máx (°C)	H.R. (%)	V. v. (m/s)	Insolación (Hora/día)	ETP (mm/mes)
Enero	17,4	30,8	77	2	5,7	101,1

Mes	T. mín (°C)	T. máx (°C)	H.R. (%)	V. v. (m/s)	Insolación (Hora/día)	ETP (mm/mes)
Febrero	17,8	31,4	76	2	5,1	93,5
Marzo	17,6	31,3	79	2	4,4	102,6
Abril	17,7	30,7	81	2	4,5	98,7
Mayo	17,8	30,5	81	2	4,8	99,5
Junio	17,5	30,7	76	2	5,4	96,0
Julio	17,2	31,7	70	3	6	104,2
Agosto	17,4	32,7	65	3	6,2	110,7
Septiembre	17,4	32,5	71	2	6	110,4
Octubre	17,4	30,9	80	2	5,1	105,1
Noviembre	17,3	29,5	84	2	4,7	92,1
Diciembre	17,3	29,7	82	2	5,3	95,5
Total						1209,3

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Tmín: Temperatura mínima, Tmax: Temperatura máxima, HR: Humedad relativa. VV: Velocidad del viento, ETP: Evapotranspiración potencial.

En la Tabla 47 se presentan los resultados de la evapotranspiración potencial estimada por los tres métodos mencionados., para el balance hídrico se utilizaron los resultados del método de Penman - Monteith para evitar subestimar o sobreestimar la ETP, al ser un valor intermedio de las tres metodologías evaluadas.

Tabla 47. Resultados obtenidos de evapotranspiración potencial.

Método	ETP (mm)
Thornthwaite	1235,3
Tanque evaporímetro	1179,4
Penman- Monteith	1209,3

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.2.6. Escorrentía mensual en las subcuencas en estudio

Se utilizaron los caudales medios mensuales generados para los drenajes identificados en el área de influencia del proyecto en el numeral [5.1.6.6.5](#). (Ver Tabla 48).

Tabla 48.Caudal medio mensual multianual en los drenajes analizados.

Subcuenca	Unidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Zanjón Los Huilos	Caudal l/s	4,73	5,38	7,13	13,13	14,37	8,79	5,04	2,93	4,61	9,16	10,6	7,42	7,77
	Escorrentía mm	19,1	19,6	28,8	51,3	58,0	34,3	20,3	11,8	18,0	37,0	41,4	29,9	369,4
Drenaje NN 1	Caudal	0,49	0,56	0,74	1,36	1,49	0,91	0,52	0,3	0,48	0,95	1,1	0,77	0,81

Subcuenca	Unidad	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	l/s													
	Escorrentía mm	18,6	19,2	28,2	50,1	56,7	33,5	19,8	11,4	17,7	36,1	40,5	29,3	361,2
Drenaje NN 2	Caudal l/s	0,41	0,46	0,61	1,13	1,24	0,76	0,43	0,25	0,4	0,79	0,91	0,64	0,67
	Escorrentía mm	18,8	19,0	28,0	50,1	56,9	33,7	19,7	11,5	17,7	36,2	40,4	29,3	361,4
Drenaje El Salado	Caudal l/s	2,31	2,63	3,48	6,41	7,02	4,29	2,46	1,43	2,25	4,47	5,18	3,62	3,80
	Escorrentía mm	19,3	19,9	29,1	51,9	58,7	34,7	20,6	12,0	18,2	37,4	41,9	30,3	374,0

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.2.7. Diferencia entre Precipitación (P), Evapotranspiración (ETP) y Escorrentía (E)

Es el balance mensual de entradas y salidas potenciales de agua del suelo. Esta diferencia clasifica los meses en secos ($P - ETP - E < 0$) y en húmedos ($P - ETP - E > 0$).

5.1.6.6.2.8. Almacenamiento del suelo (R)

El almacenamiento o reserva de agua del suelo es la cantidad de agua que un suelo contiene en un momento dado, dicha reserva varía entre un valor de cero (suelo seco) y la capacidad de campo, la cual corresponde a la cantidad de agua que queda en el suelo después de que un exceso de agua ha drenado.

5.1.6.6.2.9. Capacidad máxima de almacenamiento

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se expresa como la capacidad de almacenamiento disponible total, *Alm*, teniendo en cuenta solamente el agua que se dispone para la cobertura vegetal comprendida entre el contenido de humedad correspondiente a la capacidad de campo *Cc* y el correspondiente punto de marchitez permanente *Pmp*.

La capacidad de almacenamiento se estimó con la metodología del Soil Conservation Service que relaciona la retención potencial máxima del suelo (S) con el número de curva (CN), que tienen en cuenta características morfológicas de la cuenca. A continuación se presenta la ecuación empleada para el cálculo de capacidad de almacenamiento.

La capacidad de almacenamiento máximo de agua en el suelo, está dada por la Ecuación 22.

$$s = \frac{1000}{CN} - 10$$

Ecuación 22.

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Donde:

S es la infiltración potencial o retención potencial máxima, pulgadas.
CN es el número de curva.

Los valores de número de curva estimados para las subcuencas en estudio se presentan en la Tabla 49, de acuerdo con la metodología que se describe en detalle al final del numeral 5.1.6.6.3.1.

Tabla 49. Valores de CN y capacidad de almacenamiento del suelo para las subcuencas en estudio.

ID	Subcuenca	CNII	S
1	Drenaje El Salado	65,8	131,7
2	Zanjón Los Huilos	61,6	158,3
3	Drenaje NN 1	66,5	128,1
4	Drenaje NN 2	63,7	144,7

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.2.10. Almacenamiento en el balance hídrico

En el cálculo del balance hídrico, el almacenamiento del mes "i" (en función de la del mes anterior "i - 1") será:

$$\begin{aligned}
 R_i &= R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i) & \text{si} & \quad 0 < R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i) < CC \\
 R_i &= CC & \text{si} & \quad R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i) > CC \\
 R_i &= 0 & \text{si} & \quad 0 > R_{i-1} + (P_i - ETP_i - E_i)
 \end{aligned}$$

Ecuación 23.

Fuente: (IDEAM, 2006).

Donde:

R_i es el almacenamiento en el mes i en mm
 R_{i-1} es el almacenamiento en el mes i en mm
 P_i es la precipitación total en el mes i en mm
 ETP_i es la evapotranspiración potencial en el mes i en mm
 E_i es la escorrentía en el mes i en mm

Como se aprecia en la Ecuación 23, se necesita la reserva del mes anterior para comenzar el cálculo de la reserva, por ello, se supone que en el mes siguiente al más húmedo el suelo se encuentra saturado y por lo tanto la Reserva es igual a la Capacidad de Campo.

5.1.6.6.2.11. Infiltración (I)

Cuando el suelo está totalmente saturado o a la capacidad de campo y existe un aporte adicional del balance de P-ETP-ESC se genera la infiltración. Por tanto Ecuación 24:

$$\begin{aligned}
 I &= R_{i-1} - R_i + (P_i - ETP_i - E_i) & \text{si} & \quad R_{i-1} - R_i + (P_i - ETP_i - E_i) > 0 \\
 I &= 0 & \text{si} & \quad R_{i-1} - R_i + (P_i - ETP_i - E_i) \leq 0
 \end{aligned}$$

Ecuación 24.

Fuente: (IDEAM, 2006).

Donde:

I es la infiltración en mm
 R_i es el almacenamiento en el mes i en mm
 R_{i-1} es el almacenamiento en el mes i en mm
 P_i es la precipitación total en el mes i en mm
 ETP_i es la evapotranspiración potencial en el mes i en mm
 E_i es la escorrentía en el mes i en mm

5.1.6.6.2.12. Utilización de almacenamiento (UA)

Si el suelo se encuentra totalmente saturado o, a capacidad de campo y en los meses siguientes se presenta un balance negativo de P-ETP-ESC se utiliza el almacenamiento hasta agotarlo (Ver Ecuación 25).

$$\begin{aligned} UA_i &= 0 && \text{si} && (P_i - ETP_i - E_i) > 0 \\ UA_i &= I(P_i - ETP_i - E_i) && \text{si} && (P_i - ETP_i - E_i) < 0 \\ UA_i &= R_{i-1} && \text{si} && R_i < \sum((P_{i-n} - ETP_{i-n} - E_{i-n}) < 0) \end{aligned}$$

Ecuación 25.

Fuente: (IDEAM, 2006).

Donde:

UA_i es la utilización del almacenamiento en el mes i en mm
 R_i es el almacenamiento en el mes i en mm
 R_{i-1} es el almacenamiento en el mes i en mm
 P_i es la precipitación total en el mes i en mm
 ETP_i es la evapotranspiración potencial en el mes i en mm
 E_i es la escorrentía en el mes i en mm

5.1.6.6.2.13. Déficit de agua (D)

Es el volumen de agua que falta para cubrir las necesidades potenciales de agua (Evapotranspiración). Por tanto, el déficit de agua es Ecuación 26.

$$\begin{aligned} D_i &= 0 && \text{si} && (P_i - ETP_i - E_i) > 0 \\ D_i &= I(P_i - ETP_i - E_i) - UA_i && \text{si} && (P_i - ETP_i - E_i) < 0 \end{aligned}$$

Ecuación 26.

Fuente: (IDEAM, 2006).

Donde:

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

D_i es el déficit de agua en el mes i en mm
 U_A es la utilización del almacenamiento en el mes i en mm
 P_i es la precipitación total en el mes i en mm
 ETP_i es la evapotranspiración potencial en el mes i en mm
 E_i es la escorrentía en el mes i en mm

5.1.6.6.2.14. Evapotranspiración Real (ETR)

La ETR es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes, dependiendo de que haya suficiente agua disponible para evaporar y así llegar a la ETP o de referencia o no, por tanto, la ETP_i es siempre mayor o igual que la ETR_i . (Ver Ecuación 27).

$$ETR_i = ETP_i - D_i$$

Ecuación 27.

Fuente: (IDEAM, 2006).

Donde:

ETR_i es la evapotranspiración real en el mes i en mm
 ETP_i es la evapotranspiración potencial en el mes i en mm
 D_i es el déficit de agua en el mes i en mm

5.1.6.6.2.15. Resultados del balance hídrico

Definida la metodología para estimar los parámetros a nivel mensual, se realizó el balance hídrico en la zona de interés, para los drenajes que cruzan la zona de influencia del proyecto.

En la Tabla 50 se presenta el balance hídrico realizado para el zanjón Los Huilos, la capacidad de almacenamiento máximo es de 158,3 mm, la infiltración potencial estimada es de 48,18 mm de la precipitación total anual promedio de 1617,3 mm que equivale al 2,98% de la precipitación total anual. En la Tabla 51 se presenta la infiltración estimada en las subcuencas, la cual varía entre 2,98% y 4,86%. En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.016, se presenta el balance hídrico realizado en las cuatro subcuencas, donde la evapotranspiración real estimada varía entre 1167,5 mm y 1199,6 mm.

Tabla 50. Balance hídrico en la subcuenca del Zanjón Los Huilos (mm).

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
Precipitación (P)	83,6	99,1	153,4	251,3	207,5	95,0	75,0	47,4	120,4	196,7	173,2	114,7	1617,3
ETP (Tanque Evaporímetro)	101,1	93,5	102,6	98,7	99,5	96,0	104,2	110,7	110,4	105,1	92,1	95,5	1209,3
Escorrentía (E)	19,1	19,6	28,8	51,3	58,0	34,3	20,3	11,8	18,0	37,0	41,4	29,9	369,4
P-ETP-E	-36,5	-14,0	22,0	101,4	50,0	-35,3	-49,5	-75,1	-8,0	54,7	39,7	-10,7	
Almacenamiento (R)	47,1	33,0	55,0	156,4	158,3	123,0	73,5	0,0	0,0	54,7	94,4	83,6	
Infiltración (I)	0,0	0,0	0,0	0,0	48,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	48,2
Utilización Almacenamiento	36,5	14,0	0,0	0,0	0,0	35,3	49,5	73,5	0,0	0,0	0,0	10,7	219,6

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
(UA)													
Déficit (D)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	8,0	0,0	0,0	0,0	9,7
ETR	101,1	93,5	102,6	98,7	99,5	96,0	104,2	109,1	102,4	105,1	92,1	95,5	1199,6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 51. Infiltración potencial estimada en cada subcuenca.

Subcuenca	Panual (mm)	Infiltración (mm)	Infiltración (%)
Zanjón Los Huilos	1617,3	48,18	2,98
Drenaje NN1	1597,5	68,89	4,31
Drenaje NN2	1599,5	53,91	3,37
Drenaje El Salado	1627,3	79,08	4,86

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 51, la infiltración potencial en las subcuencas en estudio varía entre 2,98% y 4,86% de la precipitación total anual que cae sobre estas subcuencas. En los drenajes directos al río Coello (zanjón Los Huilos y drenajes NN1 y NN2) este porcentaje varía entre 2,98% y 4,31% equivalentes a 48,18 mm y 68,89 mm al año.

En el capítulo de hidrogeología numeral 5.1.7.2.4.5 Recarga al acuífero (IRp), se presentan los resultados de la modelación hidrogeológica donde se indica que para la zona de estudio existen zonas donde la recarga es igual a 0, y ésta varía entre 0 mm/año y 225 mm/año, donde las zonas de mayor recarga se concentran en el centro y noroeste del área de estudio y el valor total de la recarga es de 176,38 mm/año que equivale a 0,12 m³/s lo cual representa el 10,3% de la precipitación (1,16 m³/s). Se resalta que en la modelación hidrogeológica mencionada el área analizada es mayor al área de las subcuencas analizadas en el presente numeral de hidrología superficial, sin embargo guardan una proporción similar, en el sentido de que para las áreas de drenaje de los drenajes aferentes al río Coello se estima una infiltración del orden de 3% que es baja y concuerda con el modelo hidrogeológico donde se determinó que para la zona este donde se encuentran los drenajes NN1 y NN2 la recarga al acuífero es 0.

5.1.6.6.3. Caudales máximos

Dada la poca instrumentación de cauces cercanos al área de influencia, se evidenció la necesidad de implementar modelos de transformación de precipitación en escorrentía directa; con estos métodos, en los que se requieren datos históricos de lluvia de corta duración y que se aplican a una cuenca hidrográfica, se calcula el caudal máximo de escorrentía superficial.

En este caso se calcularon los caudales máximos con el Modelo Lluvia-Escorrentía del HEC-HMS, utilizando el método del hidrograma unitario del SCS, como se describe a continuación.

5.1.6.6.3.1. Método del hidrograma unitario del SCS

Este método se implementó para las seis subcuencas identificadas en el área de estudio que son: Zanjón Los Huilos, Drenaje El Salado, Drenaje NN 1 y Drenaje NN 2.

En términos generales, un hidrograma unitario es la función de respuesta de pulso unitario para un sistema lineal, y se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de una unidad de exceso de lluvia (precipitación efectiva)

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva (Ven Te Chow, 1994). Las suposiciones del modelo son: i) El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva, ii) El exceso de precipitación está fuertemente distribuido a través de toda el área de drenaje, iii) el tiempo base, del hidrograma unitario resultante de un exceso de lluvia de una duración dada, es constante, iv) las ordenadas de todos los hidrogramas son directamente proporcionales a la cantidad de escorrentía directa, y v) el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de una cuenca.

El SCS propuso un hidrograma sintético triangular cuya geometría (Figura 68) se define con el área y el tiempo de concentración de la cuenca, como se presenta en la Ecuación 28.

$$Q_p = 0,2083 \frac{A}{t_p} E$$

Ecuación 28.

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Donde:

A es el área de la cuenca en km².

E es la escorrentía unitaria, 1 mm

Tp es el tiempo al pico

El tiempo al pico medio desde el comienzo del hidrograma, el cual se obtiene con la expresión presentada en la Ecuación 29.

$$t_p = \frac{d}{2} + t_l = \frac{d}{2} + 0,6 * t_c$$

Ecuación 29.

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Donde:

t_l es el tiempo de rezago de la cuenca que corresponde a una fracción (60%) del tiempo de concentración t_c , definido en el numeral de morfometría

d es la duración de exceso de precipitación unitaria.

Para finalizar la descripción geométrica del hidrograma, el ancho de la base se define como la Ecuación 30

$$T_{bt} = \frac{8}{3} t_p$$

Ecuación 30.

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

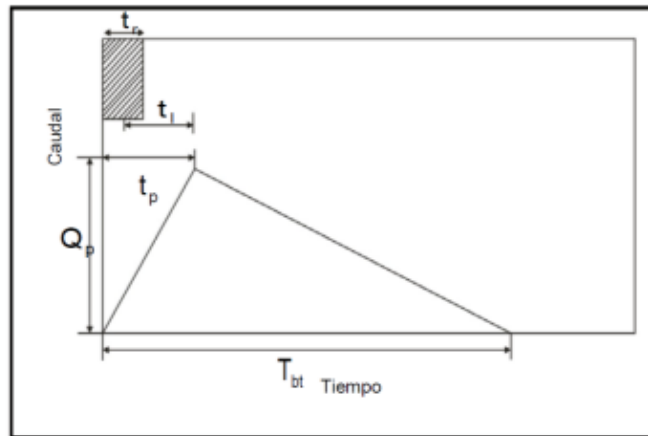


Figura 69. Hidrograma Unitario Triangular del SCS

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

El software utilizado en el modelo lluvia escorrentía fue el HEC-HMS del Hydrologic Engineering Center de los Estados Unidos que es de libre distribución y utiliza parámetros que no requieren información detallada o mediciones adicionales a registros de lluvias y caudales. Este modelo representa la relación física precipitación-suelo-cobertura del suelo-escorrentía a partir de datos de precipitación aplicada sobre un área con características morfométricas y de usos del suelo definidas generando un hidrograma de salida de la cuenca.

Como parámetros de entrada del modelo se tienen área, cobertura vegetal y usos del suelo obtenidas a partir de la información disponible de la zona, de datos abiertos del IDEAM y del IGAC.

Tormenta de diseño

La tormenta de diseño se generó a partir de la información de la estación La Resaca.

Precipitaciones máximas en 24 horas

A partir de los registros de precipitación máxima en 24 horas en la estación representativa de las subcuencas, se realizó el ajuste estadístico mediante diferentes funciones de distribución de probabilidad, seleccionando la de mejor ajuste, con el propósito de estimar las precipitaciones máximas asociadas diferentes periodos de retorno, entre 2,33 y 100 años.

En la Tabla 52 se presentan los resultados de precipitaciones máximas ajustadas a diferentes funciones de distribución de probabilidad y gráficamente en la Figura 69.

Tabla 52. Precipitaciones máximas en mm para diferentes funciones de distribución de frecuencia. Estación La Resaca.

Tr (Años)	Gumbel	Pearson	Log - Pearson	Log - Normal	EV3
2,33	91,78	89,8	90,0	91,2	89,3
5	116,23	111,8	111,1	112,4	112,4
10	136,14	129,6	128,8	129,2	130,7
15	147,38	139,6	139,0	138,4	140,7
25	161,30	151,8	151,9	149,8	152,7

Tr (Años)	Gumbel	Pearson	Log - Pearson	Log - Normal	EV3
50	179,97	168,0	169,5	164,8	168,3
100	198,50	183,8	187,7	179,6	183,1
chi ²	10,34	10,61	10,01	11,01	11,47

Fuente: Elaboración propia.

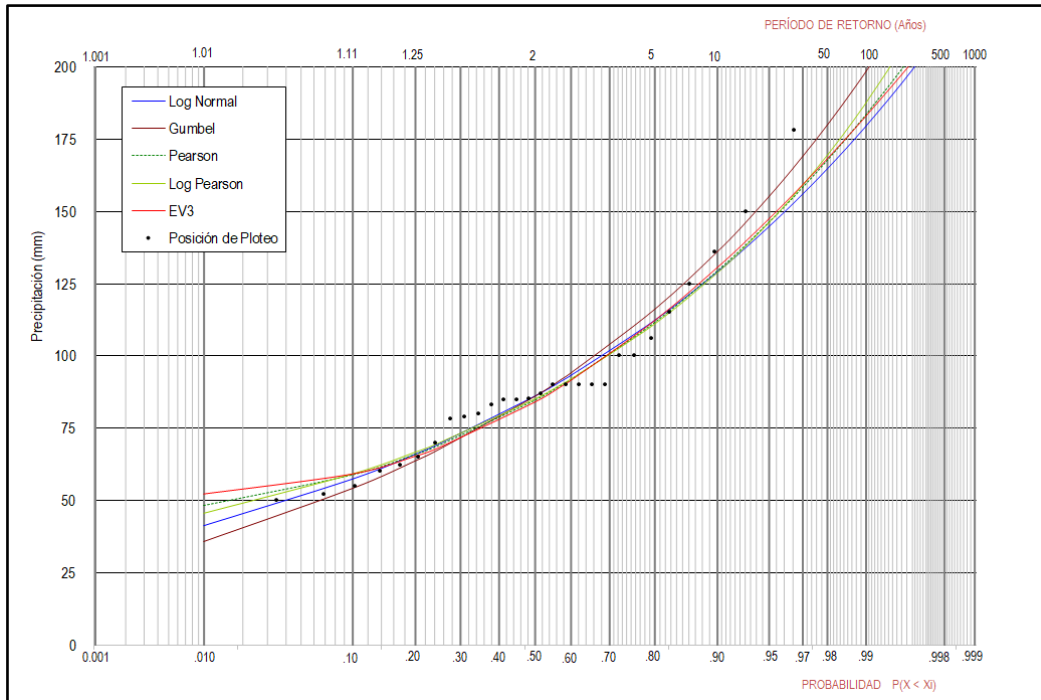


Figura 70. Representación gráfica de precipitaciones máximas ajustadas a diferentes funciones de distribución de probabilidad. Estación La Resaca.

De acuerdo con lo anterior, la función con mejor ajuste de los datos de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación La Resaca es Gumbel. En la Tabla 53 se presentan los valores de precipitación adoptados y en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.017, el ajuste a las distribuciones de probabilidad.

Tabla 53. Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno

Estación	Precipitación (mm)							Distribución Adoptada
	Tr=2 años	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=15 años	Tr=25 años	Tr=50 años	Tr=100 años	
La Resaca	91,8	116,2	136,1	147,4	161,3	180,0	198,5	Gumbel

Fuente: Elaboración propia.

Distribución espacial de la precipitación y reducción por área

Debido a que los registros de precipitación máxima en las subcuencas son puntuales por la localización de las estaciones, son máximos en 24 horas y no corresponden a duraciones inferiores de tormentas, se determinó la precipitación máxima promedio sobre las cuencas mediante el uso de diferentes metodologías.

Factores de reducción por área recomendados.

Para determinar el factor de reducción por área, el manual de drenajes del INVIAS recomienda el uso de tres ecuaciones y el uso del estudio realizado por INGETEC en 2005 para la Empresa de Acueducto de Bogotá denominado Estudio y revisión de las curvas IDF y del Análisis Espacial de las Tormentas, curvas PADF para la Sabana de Bogotá – Referencia 2.14 del manual de drenajes.

Desde la Ecuación 31 hasta la Ecuación 33, se presentan las ecuaciones recomendadas por el INVIAS para determinar el factor de reducción por área.

Ecuación de Fhrüling.

$$f(a) = 1,0 - 0,0054A^{0,25}$$

Ecuación 31.

Fuente: (INVIAS, 2009)

Donde:

A es el área de drenaje de la cuenca en m².**Ecuación del Institution of Civil Engineers – Inglaterra**

$$f(a) = 1,0 - 0,0268tc^{-0,261}A^{0,387}$$

Ecuación 32.

Fuente: (INVIAS, 2009)

Donde:

A es el área de drenaje de la cuenca en km².

Tc es el tiempo de concentración de la cuenca en horas.

Ecuación según datos de Norteamérica

$$f(a) = 1,0 - 0,05tc^{0,361}A^{0,264}$$

Ecuación 33.

Fuente: (INVIAS, 2009)

Donde:

A es el área de drenaje de la cuenca en km².

Tc es el tiempo de concentración de la cuenca en horas

En cuanto al uso del estudio realizado por INGETEC actualizado en 2014 para el Análisis Espacial de las Tormentas, se presentan en la Figura 70 las curvas PADF recomendadas por el INVÍAS, las cuales presentan las curvas de reducción de la lluvia puntual por espacialidad en la cuenca.

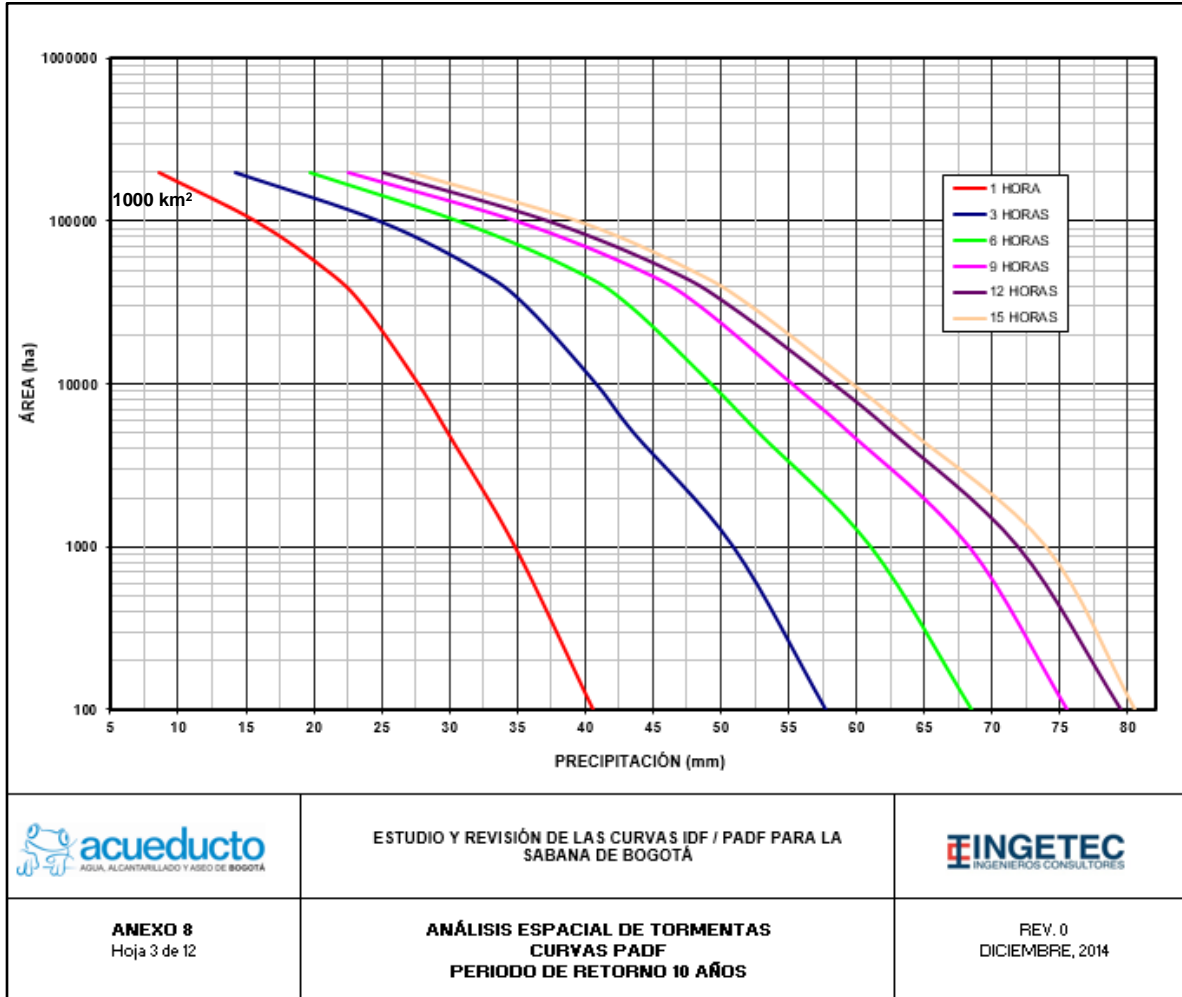


Figura 71. Curvas PADF. Periodo de retorno de 10 años

Fuente: Estudio de Análisis Espacial de las Tormentas – Curvas PADF. INGETEC, 2014

El factor de reducción será el resultado de dividir la precipitación correspondiente al área de la cuenca para una duración determinada (en este caso la duración es igual al tiempo de concentración), sobre la precipitación correspondiente a un área de 1 km² para la misma duración. En este caso, todas las subcuencas en estudio tienen un área de drenaje menor a 1 km², por lo tanto, el factor de reducción por área con el método de curvas PADF será igual a 1.

En la Tabla 54 se presenta el resumen de los resultados obtenidos a partir del uso de las ecuaciones mencionadas anteriormente y del uso de las curvas PADF, para las subcuencas analizadas.

Tabla 54. Factor de reducción por área.

ID	Cuenca	Características		Ecuación				Factor de reducción por área	Factor de reducción por área y duración
		Área (km ²)	Tc (h)	Fhruling	Institution of Civil Engineers	Datos Norteamérica	Curvas PADF		
1	Drenaje El Salado	0,32	0,52	0,87	0,98	0,97	1,00	0,96	0,48
2	Zanjón Los Huilos	0,66	0,52	0,85	0,97	0,96	1,00	0,95	0,48
3	Drenaje NN 1	0,07	0,25	0,91	0,99	0,98	1,00	0,97	0,49
4	Drenaje NN 2	0,06	0,25	0,92	0,99	0,99	1,00	0,97	0,49

Fuente: Elaboración propia.

Para considerar el efecto de reducción por duración, de las curvas PADF se relaciono la precipitación correspondiente a un área de 1 km² para una duración de 15 horas (80,5 mm) con la precipitación correspondiente a un área de 1 km² y una duración igual a 1 hora (40,6 mm) obteniéndose un factor de 0,50, el valor de duración de lluvia se adopta como 1 hora teniendo en cuenta que los tiempos de concentración de las subcuencas en estudio están entre 15 y 31 minutos.

El factor de reducción por área y duración considerando el promedio del factor de reducción por área (entre 0,95 y 0,97) es de 0,48 (0,96*0,50) para las cuencas 1 y 2, teniendo en cuenta que la diferencia es muy poca, se adopta este mismo factor para las 4 subcuencas en estudio.

Hietograma

Para la aplicación de modelos lluvia-escorrentía es necesario calcular los hietogramas de diseño, que básicamente son el ordenamiento de la precipitación de diseño durante la duración total del aguacero de diseño y el periodo de retorno que se esté analizando. La metodología implementada corresponde a la distribución del Soil Conservation Service tipo II.

En la Figura 71 se presenta la distribución temporal del evento de lluvia que se empleó en la modelación hidrológica para un periodo de retorno de 100 años para las subcuencas en estudio. En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.018, se presentan los hietogramas asociados a un periodo de retorno de 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años para las subcuencas en estudio.

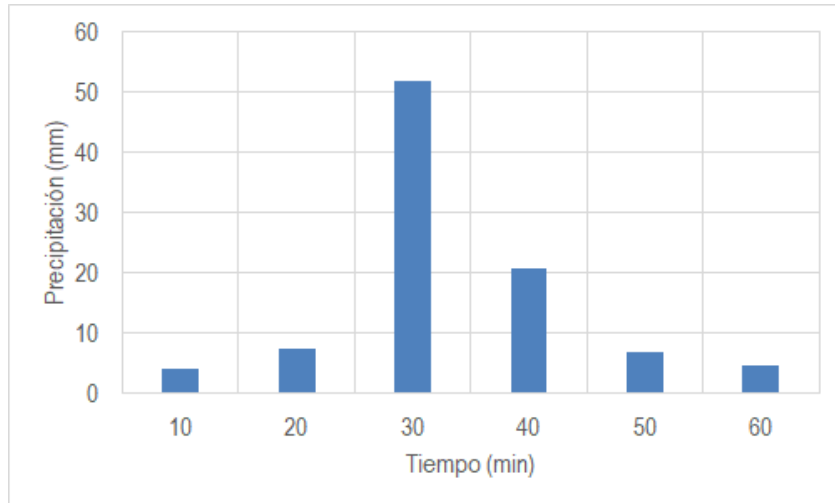


Figura 72. Distribución de la precipitación para las subcuencas en estudio, Tr 100 años.
Fuente: Elaboración propia.

Precipitación efectiva

La precipitación efectiva es la precipitación que se convierte en escorrentía directa, por lo tanto, es importante calcular las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la interceptación, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha.

El método implementado se denomina “Número de Curva”, propuesto por el SCS; en este método, la profundidad de escorrentía (es decir, la profundidad efectiva de precipitación) es una función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, denominado número de curva o CN. El número de curva varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la cuenca hidrográficas: i) tipo de suelo hidrológico, ii) utilización y tratamiento del suelo, iii) condiciones de la superficie del terreno, y (iv) condición de humedad antecedente del suelo. (INVIAS, 2009).

El valor CN corresponde con el número de curva de la metodología del Soil Conservation Service, de acuerdo con el tipo de cobertura vegetal del suelo, y la geología del suelo para las subcuencas en estudio. En la Tabla 55 se presentan los valores teóricos de CN para diferentes condiciones de suelo.

Tabla 55. Valores de CNII para diferentes usos de tierra

Descripción del uso de la tierra		Grupo Hidrológico del Suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada :	sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
	con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales :	condiciones pobres	68	79	86	89
	condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos :	condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques :	troncos delgados, cubiertas pobres, sin hierbas	45	66	77	83
	cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	óptimas condiciones :	39	61	74	80
	condiciones aceptables :	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Descripción del uso de la tierra	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras :				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

El valor de CN II utilizado corresponde principalmente a pastos y vegetación secundaria, de grupo hidrológico de suelo B (poco profundos, bien drenados y texturas gruesas a medias) como se presenta en la Figura 72 y Figura 73. En la Tabla 56 se presenta el CNII para cada subcuenca analizada.

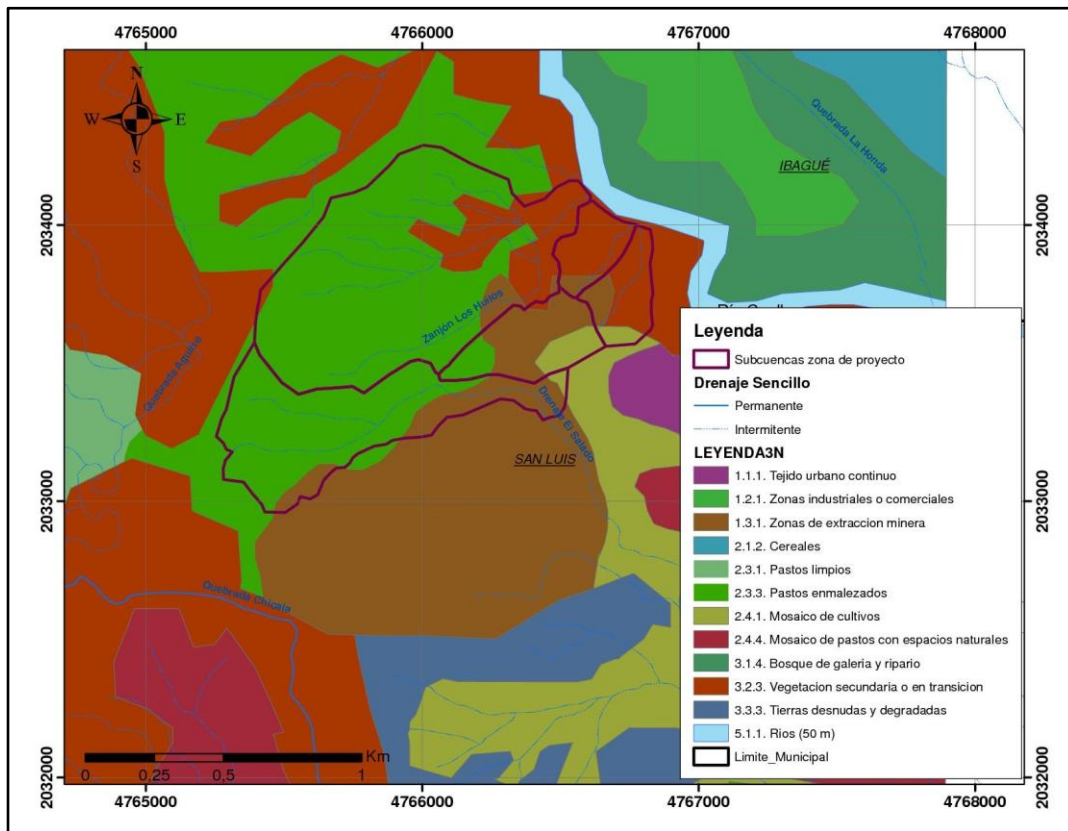


Figura 73. Mapa de cobertura vegetal en la zona de estudio

Fuente: Elaborado a partir de shape de coberturas IDEAM, disponible en el portal SIAC

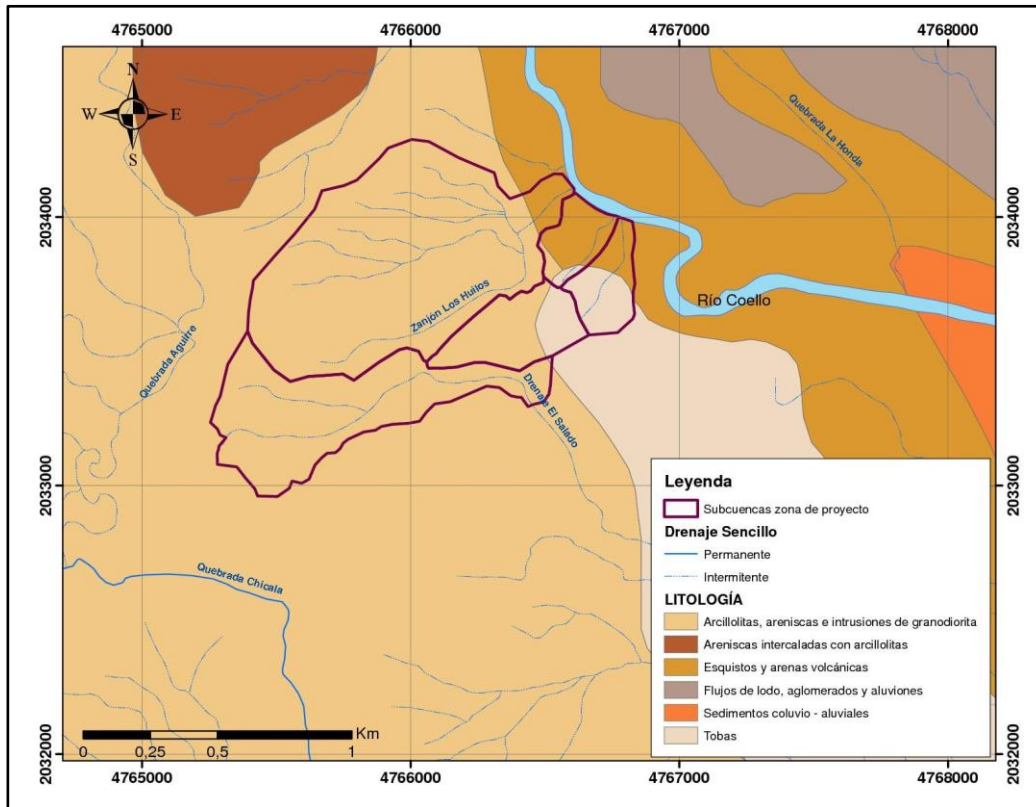


Figura 74. Mapa de tipos de suelo en la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56. Valores de CNII para las subcuencas analizadas.

ID	Subcuenca	CNII
1	Drenaje El Salado	65,8
2	Zanjón Los Huilos	61,6
3	Drenaje NN 1	66,5
4	Drenaje NN 2	63,7

Fuente: Elaboración propia.

La lluvia efectiva que causa escorrentía superficial, y la magnitud de las abstracciones de una tormenta, se pueden obtener por el método del Soil Conservation Service, a partir de la Ecuación 34 y la Ecuación 35.

$$Q = \frac{(P - 0,20S)^2}{P - 0,80S}$$

Ecuación 34.

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Donde:

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Q es la escorrentía total acumulada, pulgadas
 P es la precipitación total del evento, pulgadas.
 S es la infiltración potencial o retención potencial máxima, pulgadas.

$$s = \frac{1000}{CN} - 10$$

Ecuación 35.

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Donde:

S es la infiltración potencial o retención potencial máxima, pulgadas.
 CN es el número de curva.

5.1.6.6.3.2. Resultados

De acuerdo con las metodologías anteriormente expuestas y los parámetros morfométricos e hidrológicos de las subcuencas en estudio, se estimaron los caudales máximos para diferentes periodos de retorno. Se tomaron los resultados de las características morfométricas estimadas en el numeral [5.1.4.3.](#)

En la Tabla 57 se presenta el resumen de parámetros empleados para el cálculo de caudales máximos en subcuencas en estudio y en la en la Tabla 58 los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno para todos los cuerpos de agua identificados en el área de influencia.

Tabla 57. Resumen de los parámetros de modelación para estimar caudales máximos con el método del Hidrograma Unitario del SCS.

Subcuenca	Área (km ²)	Tc (min)	Tlag (min)	CN	Hietograma	Factor de reducción por área y duración	Duración aguacero (horas)
Drenaje El Salado	0,32	31	19	65,8	SCS II	0,48	1
Zanjón Los Huilos	0,66	31	19	61,6	SCS II	0,48	1
Drenaje NN 1	0,07	15	9	66,5	SCS II	0,49	1
Drenaje NN 2	0,06	15	9	63,7	SCS II	0,49	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58. Caudales máximos en m³/s asociados a diferentes periodos de retorno en las subcuencas analizadas.

Subcuenca	Área (km ²)	Periodo de retorno en años						
		2	5	10	15	25	50	100
Drenaje El Salado	0,32	0,295	0,738	1,234	1,559	1,995	2,630	3,310
Zanjón Los Huilos	0,66	0,275	0,926	1,687	2,187	2,927	4,045	5,266
Drenaje NN 1	0,07	0,094	0,240	0,393	0,490	0,619	0,804	1,009
Drenaje NN 2	0,06	0,048	0,143	0,252	0,324	0,420	0,561	0,711

Fuente: Elaboración propia.

La modelación realizada en HEC-HMS se presenta en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.019.

5.1.6.6.4. Caudales mínimos

La cartografía IGAC a escala 25 000 clasifica los drenajes identificados en la zona de estudio como drenajes de tipo intermitente, por lo tanto, estos cuerpos de agua pueden secarse anualmente y presentar un valor de caudal mínimo de 0 l/s. En la Tabla 59, se presenta el caudal mínimo estimado de los caudales medios mensuales.

Tabla 59. Caudales mínimo del caudal medio mensual.

Nombre	Zanjón Los Huilos	Drenaje NN 1	Drenaje NN 2	Drenaje el Salado
Tipo	Intermitente	Intermitente	Intermitente	Intermitente
Caudal (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,0

5.1.6.6.5. Caudales del río Coello

En el proyecto se tiene contemplado un punto de vertimiento de aguas lluvias interceptadas por el pit minero que infrayace al título minero 745, este punto de vertimiento se encuentra localizado sobre el río Coello, aguas arriba de la estación Limnigráfica Payandé (código 21217070), como se presenta en la Figura 74.

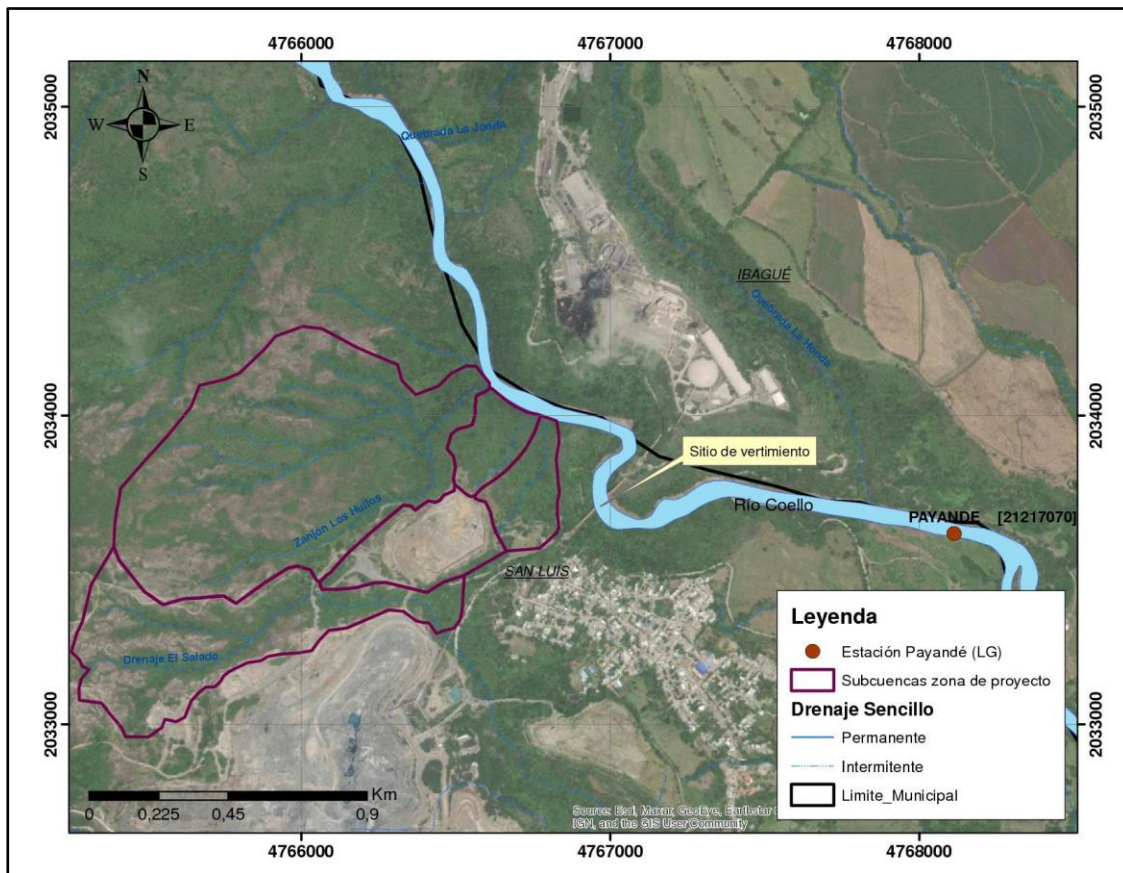


Figura 75. Localización de la estación Payandé y el sitio de vertimiento sobre el río Coello
Fuente: Elaboración propia.

Para caracterizar los caudales medios, máximos y mínimos del río Coello en el punto de vertimiento, se emplearán los registros de caudales medios diarios de la estación Payandé, que cuenta con registros para el periodo 1983-2017.

Caudales medios

Los caudales medios de la estación río Coello - Payandé se trasladaron hasta el sitio de vertimiento, teniendo en cuenta que la diferencia en áreas de drenaje es de 1,2% (área hasta Payandé 1529 km² y área hasta sitio de vertimiento 1510,7 km²).

De acuerdo con la Figura 75 el régimen de caudales del río Coello es de tipo bimodal. Los periodos de caudales por encima del promedio ocurren de abril a julio y de octubre a noviembre, siendo el mes de mayo el que presenta mayor caudal. El periodo de caudales bajos se presenta en los meses restantes (agosto-septiembre y diciembre-marzo), donde el mes de febrero presenta el caudal mensual multianual más bajo. El caudal presentado en cada mes y el caudal promedio estimado en cada subcuenca se relacionan en la Tabla 60.

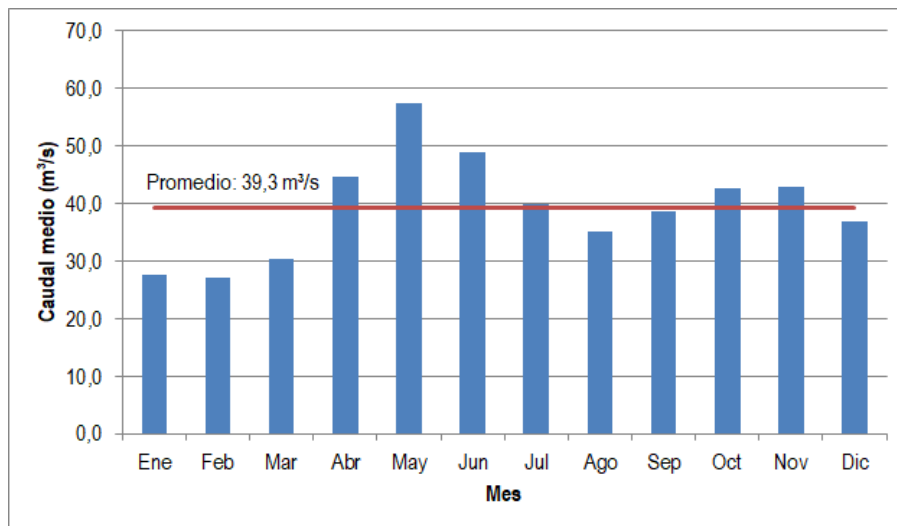


Figura 76. Distribución temporal de caudales medios mensuales en el río Coello. Periodo 1983-2017.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60. Caudal medio mensual multianual en m³/s en el río Coello. Periodo 1983-2017.

Valor	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Promedio	27,7	27,0	30,4	44,7	57,4	48,8	39,9	35,0	38,7	42,7	43,0	36,8	39,3
Máximo	56,3	69,6	61,3	89,0	260,2	97,6	77,9	66,4	94,0	86,9	74,4	96,9	260,2
Mínimo	7,5	7,1	11,1	21,2	29,9	16,5	21,2	15,9	15,8	14,3	19,5	11,9	7,1

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.5.1. Curva de duración de caudales

A partir de la serie de caudales a nivel diario se elaboró la curva de duración de caudales medios diarios del río Coello, la cual permite establecer la probabilidad de que un valor de caudal sea igualado o excedido. En la Figura 76 se presenta la curva de duración de caudales del río Coello hasta el sitio de interés, donde se observa que la curva presenta una fuerte pendiente lo que indica que el arroyo presenta caudales extremos (altos y bajos) frecuentemente, al contrario de una curva que tiende a ser plana lo cual que indica un río es autorregulado y presenta baja frecuencia de caudales muy altos o muy

bajos. En la Tabla 61 se presentan los caudales esperados a diferentes confiabilidades para los drenajes identificados en la zona de estudio (Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.015).

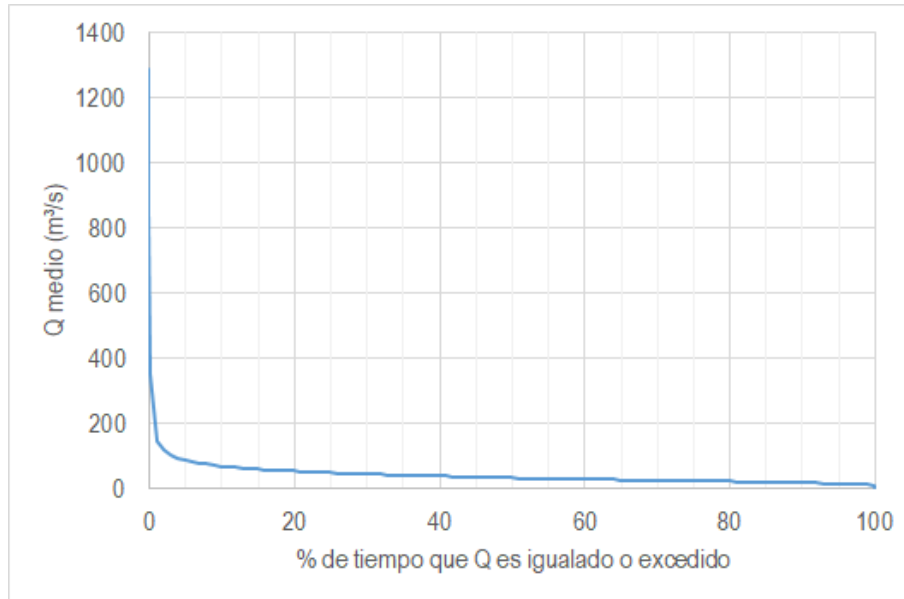


Figura 77. Curva de duración de caudales diarios. Río Coello en sitio de vertimiento.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61. Caudales esperados en el río Coello para diferentes confiabilidades en m³/s.

Percentil de excedencia	Río Coello - sitio de vertimiento
0	1289
10	67,9
20	52,3
30	43,9
40	37,3
50	31,6
60	27,5
70	24,1
80	20,8
90	16,8
95	13,6
100	2,9

Fuente: Elaboración propia.

Caudales máximos

Los caudales máximos instantáneos de la estación río Coello - Payandé se ajustaron a diferentes distribuciones de probabilidad, con el fin de calcular caudales máximos para periodos de retorno entre 2,33 y 100 años.

Previo a este ajuste se realizó una prueba de datos dudosos con el fin de identificar datos anómalos de la serie de caudales máximos instantáneos anuales. Esta prueba corresponde al método del Water Resources Council de los Estados Unidos, recomendado para detectar los puntos que se alejan de la tendencia de los valores máximos por encima o por debajo y facilitar la toma de decisiones de retención o eliminación de datos que pueden afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos. Esta metodología determina los valores de los límites superior e inferior a partir de los cuales se eliminan los valores que no se consideran estadísticamente aceptables (Figura 77).

Número Datos	29	Desviación Estandar S_y	0,2430
K_n	2,5490	Coefficiente Asimetría C_s	0,3376
Valor Máximo	1015,00		
Valor Mínimo	115,90		
y_H	3,0841	y_L	1,8453
Q_H	1214	Q_L	70

Año	Caudal m^3/s	$y = \log x$	$(y - \bar{y})^2$	$(y - \bar{y})^3$
1983	196.0	2,2923	0,0297	-0,0051
1984	635.0	2,8028	0,1143	0,0386
1985	505.8	2,7040	0,0573	0,0137
1986	467.0	2,6693	0,0419	0,0086
1987	183.9	2,2646	0,0400	-0,0080
1988	374.9	2,5739	0,0119	0,0013
1989	337.0	2,5276	0,0040	0,0002
1990	276.6	2,4419	0,0005	0,0000
1991	337.4	2,5281	0,0040	0,0003
1992	345.4	2,5383	0,0054	0,0004
1993	331.0	2,5198	0,0030	0,0002
1994	371.1	2,5695	0,0110	0,0012
1995	117.5	2,0700	0,1557	-0,0615
1996	235.0	2,3711	0,0088	-0,0008
1997	207.5	2,3170	0,0218	-0,0032
1998	936.0	2,9713	0,2566	0,1300
1999	443.0	2,6464	0,0330	0,0060
2000	1015.0	3,0065	0,2935	0,1590
2001	337.5	2,5283	0,0040	0,0003
2002	401.0	2,6031	0,0192	0,0027
2003	150.4	2,1772	0,0826	-0,0237
2004	115.9	2,0641	0,1605	-0,0643
2005	232.6	2,3666	0,0096	-0,0009
2006	193.5	2,2867	0,0317	-0,0056
2007	125.2	2,0976	0,1347	-0,0495
2008	209.4	2,3210	0,0207	-0,0030
2009	229.3	2,3604	0,0109	-0,0011
2010	167.2	2,2232	0,0583	-0,0141
2011	429.8	2,6333	0,0284	0,0048

$S =$	71,4759	1,6532	0,1263
$\bar{y} =$	2,4647		

Fórmulas:

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^3}{(n-1)(n-2)S_y^3}$$

$$y_H = \bar{y} + K_n S_y$$

$$y_L = \bar{y} - K_n S_y$$

$$Q_H = 10^{y_H}$$

$$Q_L = 10^{y_L}$$

Figura 78. Prueba de datos dudosos de caudales máximos - Estación río Coello - Payandé
Fuente: Elaboración propia.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

De los caudales máximos instantáneos registrados a nivel anual no se detectó ningún dato como dudoso, por lo cual se emplea toda la serie registrada de caudales máximos instantáneos en la estación río Coello - Payandé.

Se estimaron los caudales máximos esperados para diferentes periodos de retorno utilizando diferentes distribuciones de probabilidad, entre ellas Gumbel, Pearson, Log-Pearson, Log-Normal y EV3 (Véase Figura 78).

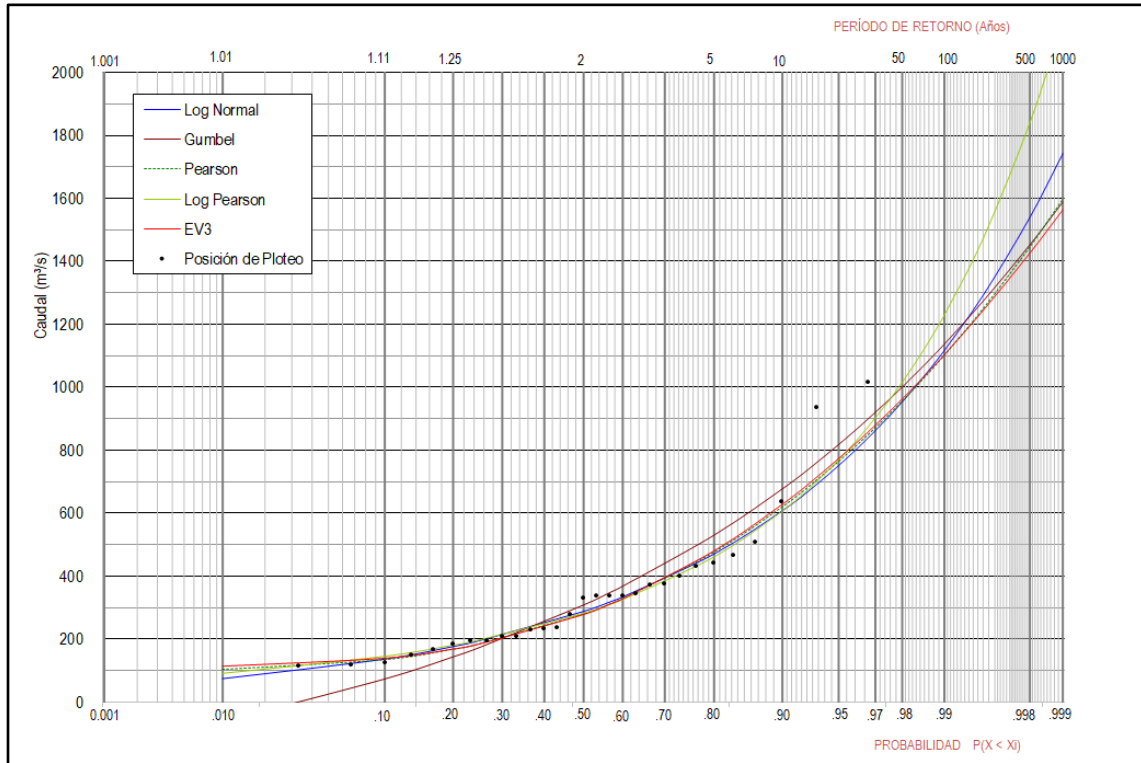


Figura 79. Ajuste probabilístico de caudales máximos - Estación río Coello - Payandé

Fuente: Elaboración propia.

Para los caudales máximos registrados en las estaciones se adoptó un ajuste de valores extremos por la función de distribución Log Pearson como la de mejor ajuste, de acuerdo con la Figura 78 y la prueba de Chi-cuadrado (véase Tabla 62).

Tabla 62. Caudales máximos para diferentes funciones de distribución de frecuencia y valores de chi-cuadrado, estación río Coello – Payandé.

Tr años	GUMBEL m³/s	PEARSON m³/s	LOG-PEARSON m³/s	LOG-NOR m³/s	EV3 m³/s
2,33	350,1	315,4	312,2	319,9	312,9
5	530,4	478,4	461,4	470,6	480,6
10	677,2	623,1	607,4	608,1	628,6
15	760,1	707,4	700,1	691,0	713,8
25	862,8	813,8	826,1	799,2	820,1
50	1000,4	958,9	1015,7	953,4	962,7
100	1137,1	1105,2	1229,9	1117,3	1103,7
Chi²	393	143,1	135,5	155,8	142,1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 63 se presentan los caudales máximos obtenidos para diferentes periodos de retorno para la estación de referencia.

Tabla 63. Caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno en estación río Coello – Payandé, Ajuste Log Pearson

Tr años	Q máximo m ³ /s
2,33	312,2
5	461,4
10	607,4
15	700,1
25	826,1
50	1015,7
100	1229,9

Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber definido los caudales máximos para diferentes periodos de retorno en la estación río Coello – Payandé, se realiza el traslado de caudales máximos hasta el sitio de interés mediante la expresión (Ecuación 36):

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^n$$

Ecuación 36.

Donde:

Q_2 : Caudal máximo instantáneo en el sitio de análisis

Q_1 : Caudal máximo instantáneo en la estación que se tienen registros

A_2 : Área de la cuenca en el sitio de análisis

A_1 : Área en cuenca de la estación que se tienen registros

n: Factor de proporcionalidad que se encuentra en el intervalo de 0,5 – 0,8 (*Flood Hydrology Manual. U.S. Department Of Interior – Bureau of Reclamation, 1992*). En este caso se tomó n=0,6.

Este método se aplicó para estimar los caudales máximos en la cuenca del río Coello hasta el sitio de vertimiento, cuyos resultados se presentan en la Tabla 64.

Tabla 64. Caudales máximos del río Coello hasta el sitio de vertimiento, a partir de la estación Payandé.

Sitio	Río Coello – Payandé	Río Coello en sitio de vertimiento
Área (km ²)	1529	1510,7
Tr (años)	Caudal (m ³ /s)	
2,33	312,2	310,0
5	461,4	458,0
10	607,4	603,0
15	700,1	695,1
25	826,1	820,1
50	1015,7	1008,4
100	1229,9	1221,1

Fuente: Elaboración propia.

Caudales mínimos

Los caudales mínimos se estimaron a partir de la serie de caudales medios diarios mínimos anuales que se obtuvieron de la serie de caudales medios diarios. Estos caudales diarios mínimos se ajustaron a diferentes distribuciones de probabilidad, con el fin de calcular caudales mínimos para periodos de retorno entre 2,33 y 100 años.

Se estimaron los caudales mínimos esperados para diferentes periodos de retorno utilizando diferentes distribuciones de probabilidad, entre ellas Gumbel, Pearson, Log-Pearson, Log-Normal y EV3 (Véase Figura 79).

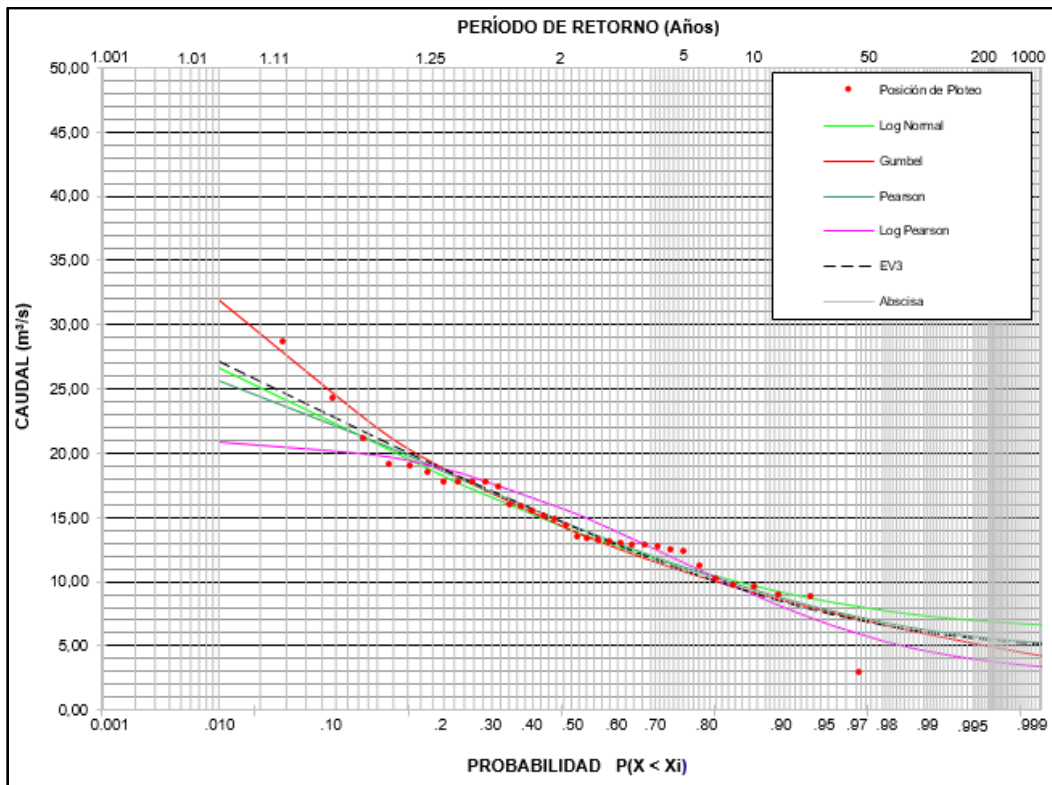


Figura 80. Ajuste probabilístico de caudales mínimos- Río Coello en sitio de vertimiento

Fuente: Elaboración propia.

Para los caudales mínimos registrados en las estaciones se adoptó un ajuste de valores extremos por la función de distribución Gumbel como la de mejor ajuste, de acuerdo con la Figura 79 y la prueba de Chi-cuadrado (véase Tabla 65).

Tabla 65. Caudales mínimos para diferentes funciones de distribución de frecuencia y valores de chi-cuadrado en el río Coello, sitio de vertimiento.

Tr años	GUMBEL m³/s	PEARSON m³/s	LOG- PEARSON m³/s	LOG-NOR m³/s	EV3 m³/s
2,33	13,161	13,534	14,553	13,257	13,451
5	10,436	10,712	10,948	10,796	10,476
10	8,919	9,081	8,615	9,479	8,8075
15	8,232	8,354	7,561	8,916	8,084

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

Tr	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEARSON	LOG-NOR	EV3
20	7,804	7,914	6,928	8,582	7,653
25	7,500	7,609	6,495	8,354	7,358
50	6,674	6,831	5,417	7,784	6,615
100	5,983	6,258	4,659	7,374	6,074
Chi ²	3,980	4,466	7,141	5,003	4,173

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 66 se presentan los caudales mínimos obtenidos para diferentes periodos de retorno para la estación de referencia.

Tabla 66. Caudales mínimos asociados a diferentes periodos de retorno en estación río Coello – Payandé, Ajuste Gumbel

Tr años	Q máximo m ³ /s
2,33	13,161
5	10,436
10	8,919
15	8,232
20	7,804
25	7,500
50	6,674
100	5,983

Fuente: Elaboración propia.

5.1.6.6.6. Índices de caracterización del régimen hidrológico

Los valores reportados en el estudio Nacional del Agua 2018¹², para las subzonas hidrográficas del río Coello y río Luisa, de la cual hacen parte las subcuencas analizadas, se presentan en la Tabla 67.

Tabla 67. Índices para la zona hidrográfica.

SZH	Nombre SZH	IRH		la	
		Valor	Categoría	Valor	Categoría
2121	Río Coello	0,76	Alta	0,20	Moderado a excedentes de agua
2118	Río Luisa y otros directos al Magdalena	0,68	Moderada	0,27	Moderado a excedentes de agua

Fuente: IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018.

Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

El índice de regulación hídrica fue estimado a partir de los datos de estaciones hidrológicas en todo el país y representado espacialmente para determinar las subzonas en condiciones de mayor y menor capacidad de retener y regular el agua (IDEAM, 2015).

¹² IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá.

DOCUMENTO No: LAES 745-INF-LL-EAMB-001- CAPÍTULO 5.1.MEDIO ABIÓTICO

El índice de retención y regulación evalúa la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales, producto de la interacción del sistema suelo-vegetación con las condiciones climáticas y con las características físicas y morfométricas de la cuenca. Igualmente, mide la capacidad de retención de humedad en las cuencas con base en la distribución de series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios, y permite evaluar la capacidad de regulación del sistema en su conjunto. Los rangos van de 0 y 1 y los valores más bajos son los que se interpretan como de menor regulación.

El índice de retención y regulación hídrica se estima mediante Ecuación 37.

$$IRH = \frac{Vp}{Vt}$$

Ecuación 37.

Fuente: IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018.

Donde:

RH es el índice de regulación hídrica.

Vp es el volumen del área por debajo del caudal medio (en curva de duración de caudales).

Vt es el volumen total de curva de duración de caudales.

El índice se calcula con base en la curva de duración de caudales medios diarios y los rangos establecidos se relacionan en la Tabla 68. En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.015 se presentan los análisis para cada subcuenca de curvas de duración de caudales e índice de regulación.

Tabla 68. Calificación de Rangos del Índice de Regulación Hídrica.

Rango de valores del Indicador	Calificación	Descripción
> 0,85	Muy alta	Muy alta retención y regulación de humedad
0,75 - 0,85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0,65 - 0,75	Moderada	Media retención y regulación de humedad media
0,50 - 0,65	Baja	Baja retención y regulación de humedad
< 0,50	Muy baja	Muy baja retención y regulación de humedad

Fuente: IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018.

Para las subcuencas analizadas el índice de regulación hídrica es de 0,62 clasificándose como baja retención y regulación de humedad.

Índice de aridez

El índice de aridez permite caracterizar el clima en una zona de manera cualitativa, mostrando condiciones con excedencia o déficit de agua. Este representa la dinámica superficial del suelo determinada a partir de las variables de evapotranspiración real y evapotranspiración potencial, y no se refiere a la dinámica subsuperficial del suelo.

La evapotranspiración potencial es un factor determinante en la obtención de este indicador, para su cálculo se utilizó la ecuación de Budyko (Ver Ecuación 38) para el cálculo de la evapotranspiración real (ETR) y la ecuación de Tanque Evaporímetro para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP). Para la ETP se tomaron los resultados del numeral [5.1.6.6.2.5](#), y para la precipitación los valores de precipitación estimados con las isoyetas para cada subcuenca. El índice de aridez se calculó con la Ecuación 39.

$$ETR = \sqrt{ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \operatorname{senoh}\left(\frac{ETP}{P}\right)\right]}$$

Ecuación 38.

Fuente: IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018.

Donde:

P es la precipitación media anual multianual en mm/año
ETP es la evapotranspiración potencial en mm
ETR es la evapotranspiración real en mm
tanh, cosh, senoh, son las funciones hiperbólicas

$$Ia = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Ecuación 39.

Fuente: IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018.

Donde:

Ia es el índice de aridez (adimensional)
ETP es la evapotranspiración potencial (mm)
ETR es la evapotranspiración real (mm)

Este índice permite determinar los grados de excedencia o déficit de agua en las diversas regiones del país de acuerdo con el mapa presentado en el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2015), donde se presenta la calificación del índice de aridez como se presenta en la Tabla 69. Para las subcuencas analizadas el índice de aridez calculado es de 0,20 y se clasifica como moderado a excedentes de agua. (Tabla 70).

Tabla 69. Calificación de Rangos del Índice de Aridez.

Rango de valores del Indicador	Calificación
< 0,15	Altos excedentes de agua
0,15 - 0,19	Excedentes de agua
0,20 - 0,29	Moderado a excedentes de agua
0,30 - 0,39	Moderado
0,40 - 0,49	Moderado a deficitario de agua
0,50 - 0,59	Deficitario de agua
> 0,6	Altamente deficitario de agua

Fuente: IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018.

Tabla 70. Índice de Aridez en las subcuencas analizadas.

Corriente	Índice de aridez	Calificación
Zanjón Los Huilos	0,20	Moderado a excedentes de agua
Drenaje NN 1	0,20	Moderado a excedentes de agua
Drenaje NN 2	0,20	Moderado a excedentes de agua
Drenaje El Salado	0,20	Moderado a excedentes de agua

Fuente: Elaboración propia.

Índice de uso del agua

Este índice hace referencia a la relación porcentual de la demanda de agua en relación a la oferta hídrica disponible. El índice de uso del agua es determinado mediante la siguiente expresión:

$$IUA = \left(\frac{Dh}{Oh} \right) \times 100$$

Donde:

Dh: Demanda hídrica sectorial.

Oh: Oferta hídrica superficial disponible (esta última resulta de la cuantificación de la oferta hídrica natural sustrayendo la oferta correspondiente al caudal ambiental).

A continuación se presentan las categorías en las cuales se califica este indicador.

Tabla 71. Calificación de rangos del índice de uso del agua

CATEGORÍA	ÍNDICE DE USO DEL AGUA	CARACTERÍSTICAS
Muy bajo	< 1%	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Bajo	1 - 10%	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Moderado	10,01 - 20%	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
Alto	20,01 - 50%	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
Muy Alto	>50%	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible

Fuente: Estudio Nacional del Agua, 2010.

Teniendo en cuenta que las subcuencas analizadas son de tipo intermitente y no se identifican demandas sobre estos cuerpos de agua, se presentan los índices de uso del agua del Estudio Nacional del Agua de 2018 para las subzonas hidrográficas del río Coello y río Luisa.

Tabla 72. Índice de uso del agua

SZH	Nombre SZH	IUA	
		Valor	Categoría
2121	Río Coello	17,4	Moderada

2118	Río Luisa y otros directos al Magdalena	62,14	Muy alto
------	---	-------	----------

Fuente: IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018.

Índice de vulnerabilidad hídrica

Este índice mide el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta en el abastecimiento de agua, que ante amenazas como períodos largos de estiaje o eventos como el fenómeno de La Niña, podría generar riesgo de desabastecimiento (IDEAM, 2014). Este índice es determinado a partir de la relación de rangos de índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de uso del agua (IUA) de acuerdo con la Tabla 73.

Tabla 73. Calificación de Rangos del Índice de Vulnerabilidad Hídrica

Vulnerabilidad del recurso hídrico. Relación IRH - IUA					
IUA Extremo: Porcentaje (Oferta/Demanda)		Índice de regulación			
Rango	Categoría	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
<1	Muy Baja	Muy Baja	Baja	Media	Media
1-10	Bajo	Baja	Baja	Media	Media
10.1-20	Moderado	Media	Media	Alta	Alta
20.1-50	Alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
50.1-100	Muy Alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
>100	Crítico	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: IDEAM, 2014.

De acuerdo con lo anterior, para un índice de uso del agua moderado (Tabla 72) en la subcuenca del río Coello y un índice de regulación alto (Tabla 67), el resultado del índice de Vulnerabilidad hídrica es de clasificación Media. Para las subcuencas del zanjón Los Huilos, drenaje El Salado y drenajes NN1 y NN2, al ser cuencas pequeñas y tener respuestas rápidas ante eventos de precipitación, el índice de regulación estimado se clasifica como bajo (0,62), entonces el índice de vulnerabilidad hídrica, adoptando el mismo índice de uso del agua el presentado para la subcuenca del río Coello (Moderado), tiene clasificación Alto.