CONTRATO No. 20240969: ESTUDIOS TÉCNICOS REQUERIDOS PARA EL TRÁMITE DE SOLICITUD DE PERMISO DE OCUPACIÓN DE CAUCE DEL RIO MOLINERO ANTE CORPOBOYACA.

Realizado por:

INGECONSULT J&C SAS
NIT. 901050445-6

Oficina de Gestión del Riesgo y Ambiente

Alcaldía Municipal de Sogamoso
Sogamoso
2024

TABLA DE CONTENIDO

1 GENERALIDADES 6

1.1 LOCALIZACIÓN 6

1.2 ANTECEDENTES 7

2 ACTIVIDADES A EJECUTAR 9

2.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO 9

2.1.1 Metodología 9

2.1.1.1 Fase 1: Trabajo de campo 10

2.1.1.2 Fase 2: Trabajo de oficina 12

2.2 ESTUDIO DE SUELOS 14

2.2.1 Geología regional 15

2.2.2 Geología local 15

2.2.3 Exploración del subsuelo 16

2.2.3.1 Sondeo 1 17

2.2.3.2 Sondeo 2 17

2.2.3.3 Ensayos de laboratorio 18

2.2.4 Muestreo en el lecho del cauce 23

2.3 ESTUDIO HIDROLÓGICO 23

2.3.1 Metodología 23

2.3.2 Caracterización climatológica 24

2.3.2.1 Curva IDF (ver ANEXO 3.1.2.1 Curva IDF) 25

2.3.3 Delimitación de la cuenca del rio Molinero 26

2.3.4 Cálculo de caudales 28

2.3.5 Hidrogramas de diseño (Ver ANEXO 3.1.2.4 Modelo lluvia escorrentia) 34

2.4 ESTUDIO HIDRÁULICO 36

2.4.1.1 Descripción del modelo (Ver ANEXO 3.1.3 MODELO HIDRÁULICO) 36

2.4.1.2 Coeficiente de rugosidad de Manning (Ver ANEXO 3.1.3 MODELO HIDRÁULICO 37

2.4.1.3 Resultados 38

2.5 ESTUDIO DE SOCAVACIÓN (Ver ANEXO 3.1.4 SOCAVACIÓN GENERAL) .. 40

2.5.1 Resultados 41

2.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN U OBRA DE PROTECCIÓN Y/O MITIGACIÓN (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO) 42

2.6.1 Análisis de estabilidad en condiciones actuales (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO) 42

2.6.2 Determinación de obra de contención/mitigación (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO) 45

2.6.2.1 Geometría del tablestacado 45

2.6.2.2 Materiales de construcción 45

2.6.3 Análisis de estabilidad en condiciones finales (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO) 46

2.6.4 Contraste entre los análisis de estabilidad en condiciones actuales y finales 48

2.6.5 Evaluación de amenaza de los taludes analizados (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO) 49

2.6.5.1 Evaluación de amenaza del talud en estudio en condiciones actuales 49

2.6.5.2 Evaluación de amenaza del talud en estudio en condiciones finales 50
2.6.5.3 Factores de seguridad básicos mínimos directos 50
2.6.6 Proceso constructivo y especificaciones técnicas para la construcción del tablestacado proyectado 51
2.6.6.1 Proceso constructivo del tablestacado.....51
2.6.6.2 Materiales para la construcción del tablestacado 52
2.6.6.3 Obras adicionales 52

2.7 PLAN DE MANEJO AMBIENTAL (PMA).....53

2.8 PRESUPUESTO.....53

3 CONCLUSIONES..... 54

4 RECOMENDACIONES 57

5 BIBLIOGRAFÍA..... 60

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Localización de los muestreos. 14
Tabla 2. Ensayos de laboratorio realizados 18
Tabla 3. Ensayos de laboratorio realizados 18
Tabla 4. Resumen de Propiedades Sondeo 1....21
Tabla 5. Resumen de Propiedades Sondeo 2....21
Tabla 6. Estaciones hidroclimatológicas adoptadas para el análisis climatológicas....24
Tabla 7. Valores de Intensidad en la Estación Aeropuerto a Lleras C AUT [24035340]. 25
Tabla 8. Cálculo de tiempo de concentración para la cuenca del río Molinero....27
Tabla 9. Grupos texturales de suelos (CN) con el drenaje natural. 29
Tabla 10. Grupos texturales de suelos (CN) para la cuenca del río Molinero 29
Tabla 11. Valores de Curva Número para unidades de cobertura y grupos de suelos. 30
Tabla 12. Definición Numero de Curva para la Cuenca del río Molinero....32
Tabla 13. Caudales de diseño para estudio hidráulico del río Molinero en el K18 35
Tabla 14. Coeficiente de rugosidad n de Manning para el Cauce del río Molinero 38
Tabla 15. Propiedades geomecánicas del perfil de suelo explorado....44
Tabla 16. Valores de los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, de las dos (2) secciones analizadas, en condiciones actuales....44
Tabla 17. Valores de los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, de las dos (2) secciones analizadas, en condiciones actuales....48
Tabla 18. Valores de los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, calculados en condiciones actuales y finales. 48
Tabla 19. Valoración de amenaza de los factores de seguridad calculados 49
Tabla 20. Grado de amenaza de los taludes en estudio analizado en condiciones actuales. 49
Tabla 21. Grado de amenaza de los taludes en estudio analizado en condiciones finales. 50
Tabla 22. Comprobación de los factores de seguridad básicos mínimos directos, margen derecha. 51
Tabla 23. Comprobación de los factores de seguridad básicos mínimos directos, margen izquierda. 51
Tabla 24. Programas del PMA 53
Tabla 25. Propiedades geomecánicas del perfil de suelo explorado....55

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Localización del tramo de intervención del Río Molinero 7
Figura 2. Metodología para el levantamiento topográfico....10
Figura 3. Ubicación en planta de los 2 sondeos para estudio de suelos y los 2 muestreos de lecho de cauce....15
Figura 4. Distribución geológica Área de Estudio....16
Figura 5. Perfil Sondeo 1....19
Figura 6. Perfil Sondeo 2....20
Figura 7. Perfil litológico transversal....20
Figura 8. Perfil Geológico Geotécnico área de estudio 22
Figura 9. Localización estaciones IDEAM cerca al sitio de estudio....24
Figura 10. Curva IDF de función de intensidad vs tiempo con periodos de retorno 25
Figura 11. Cuenca de río Molinero a la altura de la carrera 4A. 26
Figura 12. Tipo de suelos en la cuenca del río Molinero 28
Figura 13. Cobertura de la tierra en la cuenca del río Molinero 30
Figura 14. Hidrograma SCS Cuenca río Molinero TR2.33 34
Figura 15. Hidrograma SCS Cuenca río Molinero TR25 35

Figura 16. Hidrograma SCS Cuenca río Molinero TR50 35
Figura 17. Planta modelo hidráulico en Hec-Ras del río Molinero.....37
Figura 18. Profundidades de flujo, para un periodo de retorno de 2.33 años.....39
Figura 19. Velocidades de flujo, para un periodo de retorno de 2.33 años 39
Figura 20. Profundidades y velocidades de flujo, para un periodo de retorno de 50 años.....40
Figura 21. Profundidades de flujo, para un periodo de retorno de 50 años.....40
Figura 22. Esquema de descenso del lecho por socavación general.....41
Figura 23. Corte Geológico - Geotécnico A - A´ (Km0+100), del terreno en condiciones actuales. .43
Figura 24. Corte Geológico - Geotécnico B - B´ (Km0+130), del terreno en condiciones actuales. .43
Figura 25. Dimensiones del tablestacado recomendado.....46
Figura 26. Corte Geológico - Geotécnico A - A´ (Km0+100) del terreno en condiciones finales.....47
Figura 27. Corte Geológico - Geotécnico B - B´ (Km0+130) del terreno en condiciones finales. 47

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Registro fotográfico del estado actual del tramo del río Molinero.....8
Fotografía 2 Equipo RTK E-Survey E300-PRO.....11
Fotografía 3 Trabajo de campo. BASE 01.....11
Fotografía 4 Evidencia fotográfica de las labores de campo.....12
Fotografía 5 Localización y labores ejecución Sondeo 1 17
Fotografía 6 Localización y labores ejecución Sondeo 2 18
Fotografía 7 Procedimiento de Muestreo 23

1 GENERALIDADES

El tramo del río Molinero, ubicado en el sector de Monquirá, municipio de Sogamoso, presenta antecedentes de desprendimiento de material en una de sus riberas, y perdida de la banca de la vía de acceso a la comunidad, lo que incrementa el riesgo de represamientos y la posibilidad de crecientes súbitas. Como medida de prevención y mitigación de riesgos, se propone la ejecución de una obra de estabilización orientada a garantizar la estabilidad geotécnica del terreno. Para llevar a cabo este proyecto, es indispensable gestionar el permiso de ocupación de cauce ante Corpoboyacá, conforme a los requisitos establecidos por la normatividad vigente. Dicho permiso será otorgado una vez se demuestre la necesidad técnica del proyecto, su viabilidad ambiental y el cumplimiento de los lineamientos técnicos exigidos por la corporación ambiental.

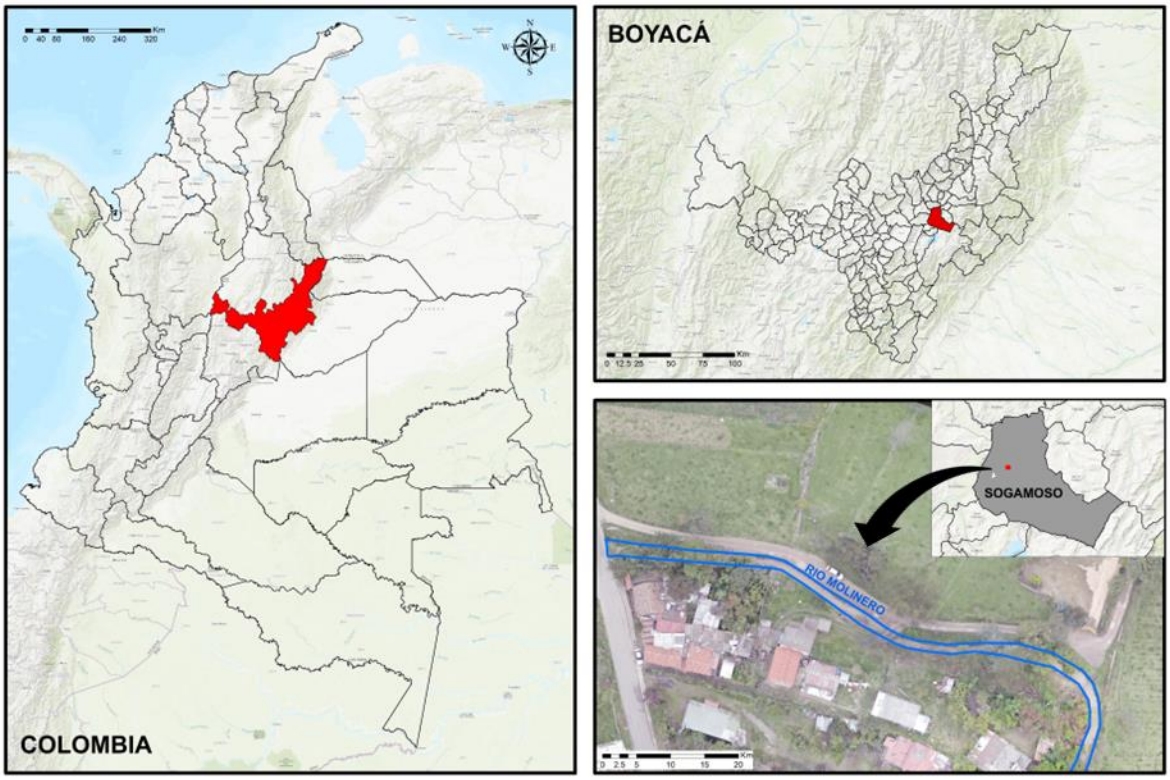
De parte del municipio, la mitigación del escenario riesgo que se indica anteriormente en el tramo del río Molinero, hace parte del proyecto “Transformación hacia una ciudad resiliente y adaptada frente a desastres en Sogamoso”, que tiene como objeto “Contar con una herramienta de gestión que le permita al Municipio de Sogamoso y a las entidades administrar de manera adecuada y sostenible los recursos físicos, técnicos, financieros y humanos, y actuar de manera efectiva, oportuna y coordinada ante situaciones de emergencias y desastres que pueden presentarse, desarrollando acciones de reducción del riesgo, prevención, atención y mitigación del riesgo”, y se encuentra adscrito en el Plan de Desarrollo del Municipio de Sogamoso (2024 – 2027) (Puede ser consultado a través del link https://www.sogamoso-boyaca.gov.co/planes/proyecto-plan-de-desarrollo-vigencia-20242027-sogamoso)

1.1 LOCALIZACIÓN

El rio Molinero, hace parte de la hoya tributaria del río Monquirá. El tramo de interés que tiene una longitud de 170 mts aproximadamente, se localiza en la parte baja de la corriente, donde se configura el límite entre las veredas Monquirá, Primera Chorrera y Segunda Chorrera, en el sector conocido como La Playita, ubicado hacia el occidente del municipio de Sogamoso, aproximadamente a 500 mts al sureste del límite urbano. (Ver Figura 1)

El sector La Playita, ha experimentado un desarrollo urbanístico significativo a lo largo de los años, lo que ha incrementado notablemente el índice de ocupación del área. En este sector se realizan actividades económicas a pequeña escala, como agricultura, ganadería y pastoreo, lo que hace necesario contar con vías de tránsito para las personas y el transporte de productos. Históricamente, los pobladores utilizaban un camino alterno de carácter peatonal para desplazarse y movilizar productos como hortalizas, papa y animales (vacas, ovejas y gallinas) hacia los puntos de venta. Sin embargo, con el tiempo, y gracias a las intervenciones realizadas tanto por la comunidad como por las administraciones municipales, dicho camino se ha transformado en una vía de acceso vehicular y peatonal cuyo trazado es paralelo a la corriente del río Molinero, facilitando la conectividad hacia las viviendas del sector.

Figura 1. Localización del tramo de intervención del Río Molinero



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

1.2 ANTECEDENTES

La dinámica ocupacional en el área se enfocó en la urbanización de espacios naturales, ampliando progresivamente la construcción de viviendas. Este proceso implicó incursiones antrópicas sobre suelos naturales, muchas veces sin considerar las condiciones técnicas, físicas y estructurales del terreno. En el contexto del cambio climático global, caracterizado por lluvias más intensas y períodos de calor prolongado, se han identificado factores relevantes que contribuyen al desprendimiento de material, alterando la estabilidad dinámica del suelo y modificando la frontera hídrica. Estas dinámicas exacerban los riesgos asociados a la interacción entre las actividades humanas y los ecosistemas naturales. De acuerdo con las manifestaciones de la comunidad, en el sector La Playita se han registrado antecedentes de desbordamientos en el río Molinero, lo que ha ocasionado encharcamientos en los predios aledaños. Durante las épocas de lluvias, el aumento significativo del caudal genera incrementos en la altura de la lámina de agua, desprendimientos y arrastre de material. Ante esta problemática, se hace necesario formular estudios técnicos y diseñar intervenciones integrales que incluyan la contención del talud de la vía, y, de manera prioritaria, la preservación del recurso hídrico. Estas acciones deben orientarse hacia el desarrollo socioeconómico del área, atendiendo las necesidades de la población, aprovechando las potencialidades del territorio y garantizando la sostenibilidad ambiental. En la Fotografía 1 se muestra el panorama actual del tramo del río Molinero.



Fotografía 1 Registro fotográfico del estado actual del tramo del río Molinero

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2 ACTIVIDADES A EJECUTAR

Para la caracterización ambiental de la zona de estudio y el diseño de la obra de mitigación del riesgo, se ejecutan las siguientes actividades:

- Levantamiento topográfico del río Molinero, y su frontera hídrica.
- Estudio de suelos
- Estudio hidrológico (Según la Resolución 330 de 2017).
- Estudio hidráulico y cálculo de caudales.
- Estudio de socavación en el lecho del río Molinero.
- Diseño de la estructura de contención u obra de protección y/o mitigación
- Plan de manejo ambiental

Cada una de las actividades se describen a continuación.

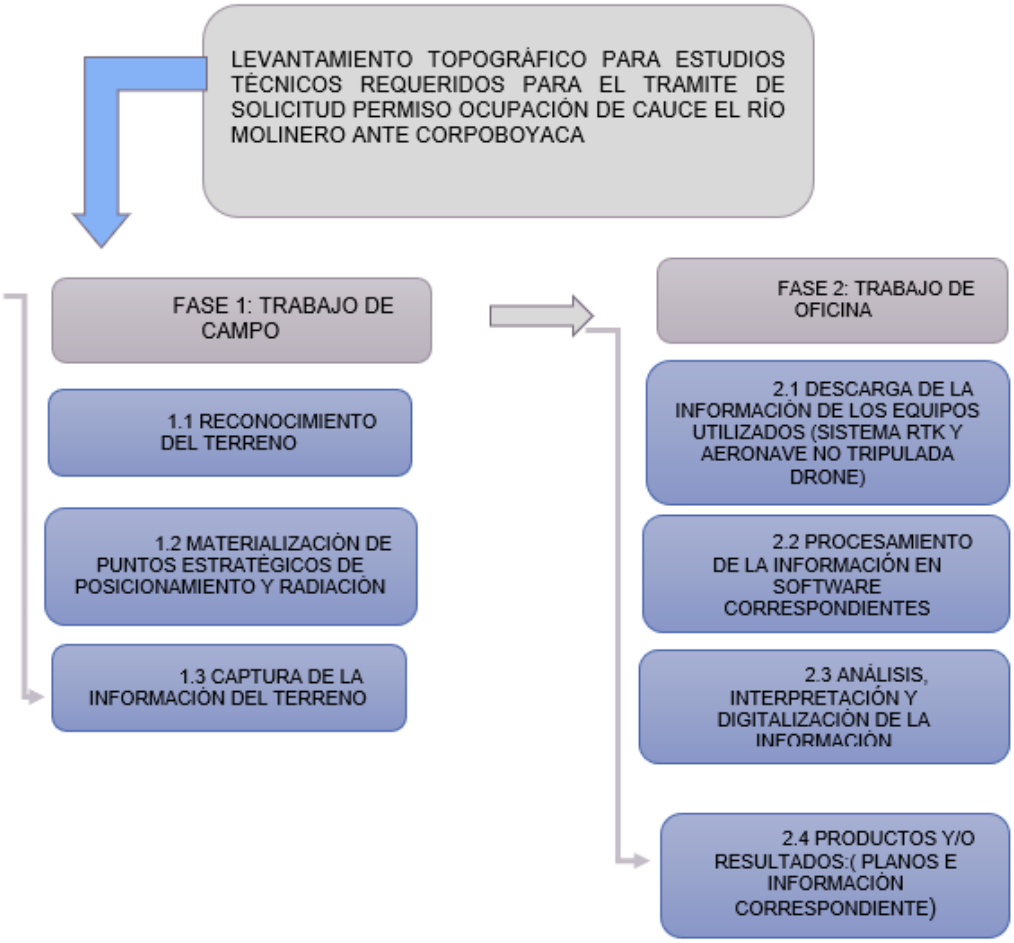
2.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

En el marco del Contrato 20240969 con objeto “Estudios técnicos requeridos para el trámite de solicitud de permiso de ocupación de cauce del rio molinero ante Corpoboyacá”, se lleva a cabo el levantamiento topográfico necesario para dichos estudios. Este proceso requiere la definición de lineamientos técnicos específicos que permitan configurar la geometría de la estructura propuesta. Para ello, se implementan métodos topográficos ópticos convencionales y sistemas de posicionamiento en tiempo real (RTK) en campo. Asimismo, se establecen las condiciones para la entrega de los productos intermedios y la consolidación del informe final, garantizando el cumplimiento de los requisitos técnicos y normativos establecidos por la autoridad ambiental.

2.1.1 Metodología

De manera general, la metodología para el levantamiento topográfico consiste en dos fases principales: una fase de trabajo de campo y otra fase de trabajo de oficina. En la primera fase, se realiza el reconocimiento del terreno, se materializan los puntos estratégicos de posicionamiento y radiación, y se captura la información del terreno; en la segunda fase de trabajo de oficina, se descarga de la información de los equipos utilizados, se procesa la información en softwares correspondientes, se realiza el análisis, interpretación y digitalización de la información y finalmente se elaboran los productos y resultados topográficos. (Ver Figura 2)

Figura 2. Metodología para el levantamiento topográfico



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.1.1.1 Fase 1: Trabajo de campo

2.1.1.1.1 Reconocimiento del terreno

El trabajo de campo se realizó durante el día 21 de noviembre del 2024, para lo cual se realizó un recorrido preliminar de la totalidad del tramo del río, con el objeto de identificar puntos estratégicos que permita un mayor rendimiento en cuanto a señal y visualización entre los mismos de acuerdo a los equipos topográficos a utilizar, posteriormente, en razón a lo analizado con el recorrido en mención se procede a ejecutar el trabajo con un (1) frente o comisión de topografía. El equipo RTK utilizado corresponde a un receptor GNSS marca E-Survey, modelo E300-PRO con serial E30P3A2000672 (Ver Fotografía 2)



Fotografía 2 Equipo RTK E-Survey E300-PRO

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.1.1.1.2 Materialización de puntos estratégicos de posicionamiento y radiación

Se materializaron puntos de base y puntos de control para la respectiva sesión de posicionamiento, los cuales se ubican en el área de estudio previamente establecidos para el proceso de la toma de la información; posteriormente se materializan puntos auxiliares o transitorios para la captura de información detallada de la zona. Con la materialización de los puntos se procede a estacionar y georreferenciar equipos de manera que funcionan como puntos de control, estaciones o deltas para de tal manera proceder capturar la correspondiente información de la topografía y/o batimetría del terreno Toda la información de campo fue capturada en la memoria de los receptores de GPS base, Rover marca E SURVEY E300 PRO Y STONEX SA900 para posteriormente ser descargada a la computadora a través de los programas trimble businnes center y topcon Tools. Esta información ha sido procesada en la misma memoria de los GPS por archivos Rinex.



Fotografía 3 Trabajo de campo. BASE 01.

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 1.4 REGISTRO FOTOGRAFICO)

2.1.1.1.3 Captura de información del terreno

Para el desarrollo de la actividad de capturar información del terreno, se establecen tramos del cauce de acuerdo a un abcisado establecido de manera preliminar, tratando de conservar un orden consecutivo; por otra parte se presentaron alteraciones del orden del abcisado para el desarrollo de la actividad debido a condiciones climáticas, que obligaron a ejecutar labores en tramos diferentes, es de gran importancia mencionar que este tipo de eventualidades no alteran el resultado del producto a entregar.

Los puntos sugeridos para la toma de información en campo pueden variar espacialmente de acuerdo a las características identificadas en el sitio, tratando de mantener la premias de espaciamiento entre secciones de 10 metros. Se recolecto información detallada pero dadas las condiciones físicas del terreno, como pendiente abrupta o cambios significativos en la geometría del cauce, se encuentran cambios drásticos en la sección analizada, se reduce el espaciamiento entre secciones hasta 10 metros, garantizando una adecuada definición de la superficie del cauce.

Por la naturaleza del terreno el desarrollo de la actividad se dio de manera diferente en cuanto a la metodóloga técnica (Radiación convencional, sistema RTK), utilizada para cada tramo debidamente abcisado en el trascurso del cauce de la quebrada, según el avance del día de labor.



Fotografía 4 Evidencia fotográfica de las labores de campo

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 1.4 REGISTRO FOTOGRAFICO)

2.1.1.2 Fase 2: Trabajo de oficina

2.1.1.2.1 Descargue de la información

Una vez recolectada la totalidad de la información de campo se procede al descargue de los datos crudos los cuales están debidamente almacenados en la memoria interna de cada uno de los equipos utilizados.

2.1.1.2.2 Procesamiento de la información

Para la georreferenciación de los vértices o placas Topográficas se realizó la verificación del posicionamiento y traslado de coordenadas utilizando como referencias la estación fija-permanente en TUNJA – Boyacá, utilizando el equipo en modo estático y un GPS móvil que se estacionó sucesivamente en los puntos de control con tiempos establecidos de observación en cada estación, tiempos que se toman en función de las distancias entre los puntos a resolver.

2.1.1.2.3 Análisis, interpretación y digitalización de la información

La digitalización es el proceso de transformar procesos analógicos y objetos físicos en digitales, de tal manera que toda la información recolectada en campo es procesada con los softwares correspondientes para el debido manejo de la misma.

Una vez procesada la información se procede a realizar la tabla o formatos donde se especifica los tiempos, coordenadas en sistema plano origen central y sistema elipsoidal (esto con el fin de facilitar la interpretación de las mismas y dar celeridad a los procesos posteriores), también se realizar una breve descripción del acceso para ser ubicados en el terreno, presentando una imagen general del cauce del rio Molinero, una imagen detallada mostrando coordenadas y abscisa y una fotografía de la evidencia del proceso.

Luego de recopilar toda la información se organiza de manera descriptiva en un archivo general en extensión XML, CVS donde se especifica las coordenadas Norte, Este, Cota y la respectiva descripción del punto (ANEXO 1.1 CARTERA TOPOGRAFICA) para posteriormente generar una nube de puntos en archivo CAD.

2.1.1.2.4 Productos y resultados (ANEXO 1.5 SALIDA GRAFICA (PLANOS))

Para la adecuación de la información de los programas usados, se diseñó una hoja de cálculo (CARTERA) que permitió tener la información en el formato csv para su importación, utilizando el software Civil Cad, CIVIL 3D.

Utilizando el software Topcon Tools v.8.2. Se transforma los datos crudos. raw a información organizada en formatos Exel. Csv, tex, para proceder al dibujo de los planos con la ayuda del software CivilCad, CIVIL 3D teniendo en cuenta los formatos e indicaciones de la norma establecida. (resolución 643 de mayo 30 de 2018 y resolución 1562 de septiembre de 2018 del instituto geográfico Agustín Codazzi IGAC).

Teniendo la nube de puntos general o total se procede a dibujar de manera digital las características del terreno de acuerdo con sus respectivas capas, colores, grosor de líneas y de más aspectos técnicos, en el plano topográfico final se generan los siguientes componentes:

- Curvas de nivel primarias y secundarias, donde su espaciamiento se da cada 10 metro para las primarias y cada 1 metros para las secundarias.
- Digitalización en planta de las características del terreno: forma, longitud total, relieve topográfico, intersección de vías, localización de viviendas.

- Se genera un perfil longitudinal que muestran a detalle el contorno de la zona con distanciamiento desde el eje del cauce de 10 metros aproximadamente.
- Se establece un abcisado del perfil longitudinal cada 10 metros, debido a que la naturaleza del levantamiento es de forma lineal y distante.
- Triangulación topográfica de la nube de puntos total, generando un modelado isométrico en 3D.

2.2 ESTUDIO DE SUELOS

La investigación del subsuelo se desarrolla mediante 2 perforaciones a una profundidad promedio de 3.00 m, mediante la exploración directa, empleando equipo de perforación manual, el cual permite realizar un muestreo de suelo inalterado. Los ensayos de laboratorio suministran la información necesaria para lograr clasificar el suelo, tales como Límites de Atterberg, granulometrías por lavado, corte directo, sumado a esto se tomaron dos muestras del material del cauce del Río Molinero. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

Posterior al proceso de investigación del subsuelo se realiza la caracterización geotécnica mediante un adecuado análisis de resultados de laboratorio definiendo así los comportamientos esperados y las características geotécnicas que permitan elaborar el modelo geológico-geotécnico para el sitio de estudio.

En la Tabla 1 se expone la localización y profundidad de cada uno de los sondeos y toma de muestras lecho del cauce a realizar; en la Figura 3 se muestra su ubicación espacial.

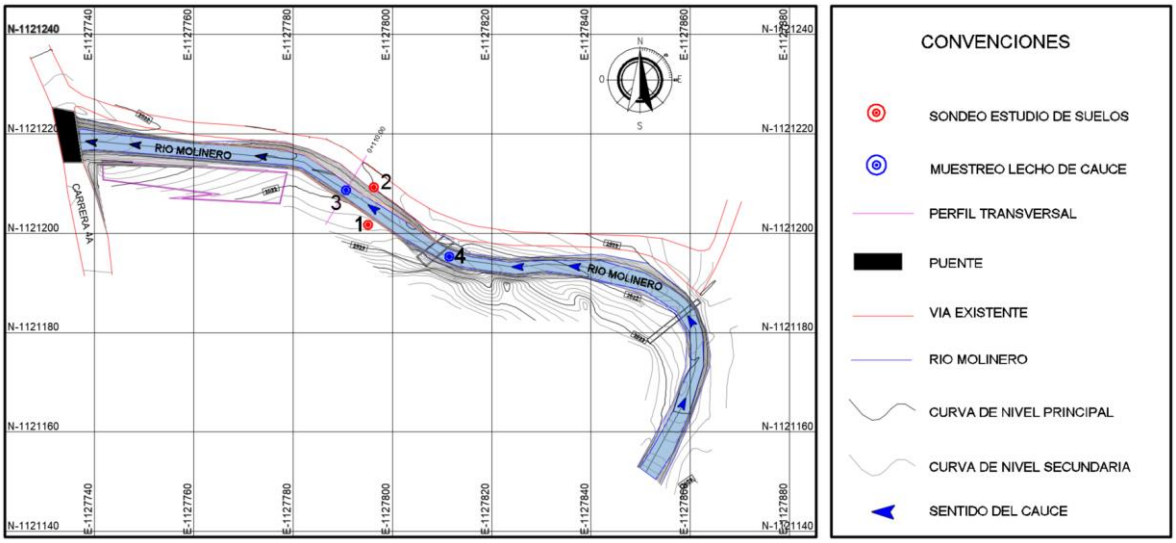
Tabla 1. Localización de los muestreos.

MUESTRAS ESTUDIO DE SUELOS			
Sondeo	D.F (m)	Coordenadas	
		Este	Norte
Sondeo 1	1.50	1´127.795.08	1´121.201.69
Sondeo 2	3.00	1´127.796.25	1´121.209.25
MUESTRAS LECHO CAUCE			
No	Sitio de toma	Coordenadas	
		Este	Norte
Muestra 3	Lecho cauce	1´127.790.66	1´121.208.66
Muestra 4	Lecho cauce	1´127.811.46	1´121.195.28

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

La zona de estudio para la realización de los estudios técnicos requeridos para la solicitud de permiso de ocupación del cauce del río Molinero ante Corpoboyacá se caracteriza por su morfología variada. Hacia el norte, se presenta una topografía plana que se extiende a lo largo de la vía adyacente y paralela al río Molinero actualmente este sector es empleado para cultivo de pastos y ganadería, En contraste, el sur del cauce muestra una pendiente suave, lo que sugiere una transición gradual en la elevación del terreno y este sector se caracteriza por contar con viviendas familiares, lo que refleja un entorno residencial enfocado en la convivencia y el bienestar de las familias. Este tipo de viviendas suelen ofrecer espacios amplios y funcionales, adaptados para satisfacer las necesidades de los distintos miembros del hogar.

Figura 3. Ubicación en planta de los 2 sondeos para estudio de suelos y los 2 muestreos de lecho de cauce.



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

La rasante de la vía en esta área se encuentra sin pavimentar, y el tramo específico que se analizará tiene una longitud promedio de 70 metros. Es relevante destacar que la corriente de agua en este sector fluye en dirección este-oeste, lo cual es crucial para entender la dinámica del cauce y su interacción con el entorno circundante. Esta información es fundamental para llevar a cabo un análisis técnico adecuado y garantizar que se cumplan las normativas ambientales y de uso del suelo establecidas por las autoridades competentes.

2.2.1 Geología regional

Las rocas que constituyen el área de estudio pertenecen a la parte axial de la Cordillera Oriental de Colombia, donde se expone una secuencia Lito-estratigráfica de origen sedimentario correspondiente a la cuenca Sogamoso-Paz de Rio que alcanza un espesor promedio de 5000 m. Realizando un recorrido estratigráfico en el área de estudio se encuentran rocas que vienen desde el Jurásico al Cretácico inferior, Cretácico Superior hasta el Cuaternario. Para la descripción de cada una de las unidades estratigráficas se tuvo en cuenta la plancha geológica 172 a escala 1:100.000 del año 1994 con su respectiva memoria explicativa.

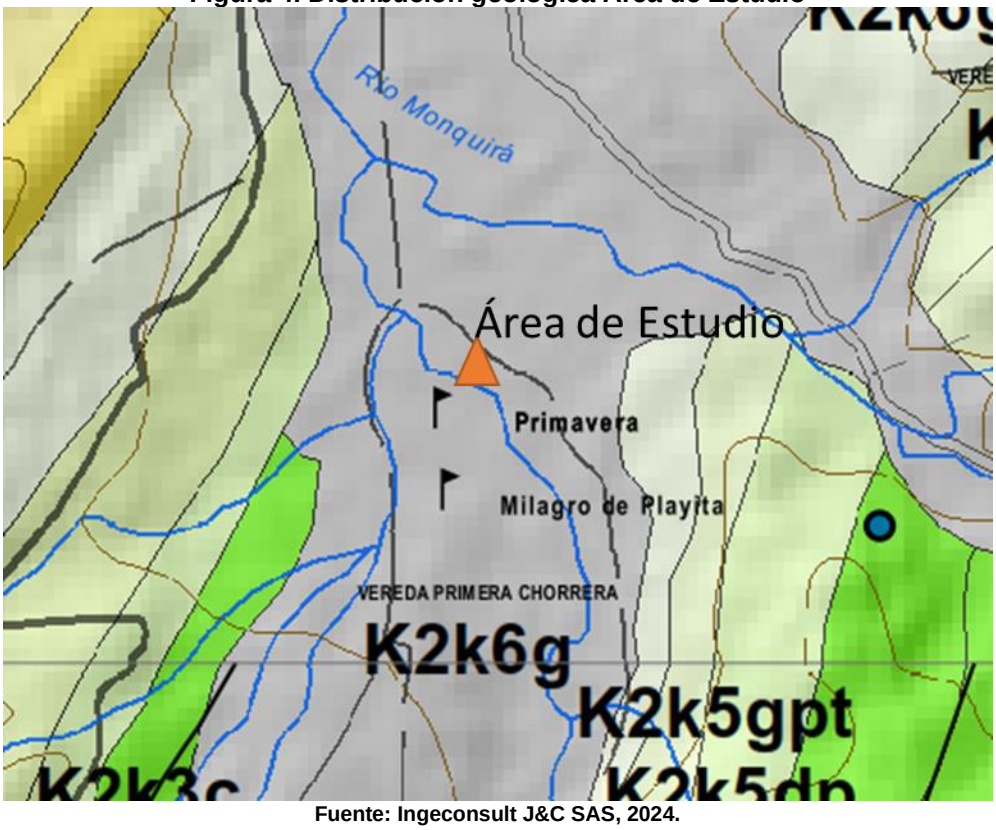
2.2.2 Geología local

Localmente el área de estudio se localiza en el valle Sogamoso-Duitama sobre rocas reciente pertenecientes al cuaternario a continuación se realiza una descripción de los materiales que los conforman.

- **Sistema Cuaternario**: corresponde a todo el conjunto de materiales provenientes de la erosión de la cordillera, acumulados a partir del Terciario superior hasta nuestros días.

- **Depósitos Aluviales (Qal):** Consisten de bloques redondeados a subredondeados, principalmente de arenitas, en una matriz areno arcillosa. Presentan una morfología plana. Se localizan en las Veredas Siatame, La Manga, San José, en gran parte del Área Urbana, Villita y Malpaso, Venecia, Villita y Malpaso, Vanegas, La Ramada, Mortiñal y Las Cintas, (Ver Figura 4).

Figura 4. Distribución geológica Área de Estudio



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.2.3 Exploración del subsuelo

Con el propósito de establecer la configuración estratigráfica, propiedades y características geotécnicas del suelo estudiado; se realizó una exploración directa mediante la ejecución de 2 Sondeos. (Ver Figura 3)

Las exploraciones se inician mediante la utilización de hoyadora y herramienta de mano, posteriormente, teniendo en cuenta la consistencia del suelo, el muestreo se realiza mediante la utilización de los dispositivos de: pared delgada (Tubo Shelby) suelos blandos y cuchara partida (Split Spoom), para suelos duros. Actividad que permitió el muestreo continuo, registrando en formato de campo entre otros aspectos, numero, profundidad, y tipo de muestra, presencia o no de nivel freático y una descripción visual cualitativa.

Con base en la descripción visual, registros de profundidad y nivel de consistencia de los suelos recuperados, a partir del número de golpes en la prueba de SPT, se configura a priori un perfil estratigráfico cualitativo en cada sondeo.

2.2.3.1 Sondeo 1

Ubicado en el punto referido con las coordenadas E: 1´127.795.08 N:1´121.201.69 el sondeo alcanzó una profundidad máxima de 1.50 m. Durante la ejecución del sondeo se adelantó la toma de muestras alteradas, la Fotografía 5 muestra el punto y actividades de muestreo durante la ejecución del sondeo.



Fotografía 5 Localización y labores ejecución Sondeo 1

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

La investigación del subsuelo en el sondeo N.1, alcanzo una profundidad máxima de exploración de 1,50 m. Actividad que permitió establecer mediante inspección visual la siguiente estratigrafía:

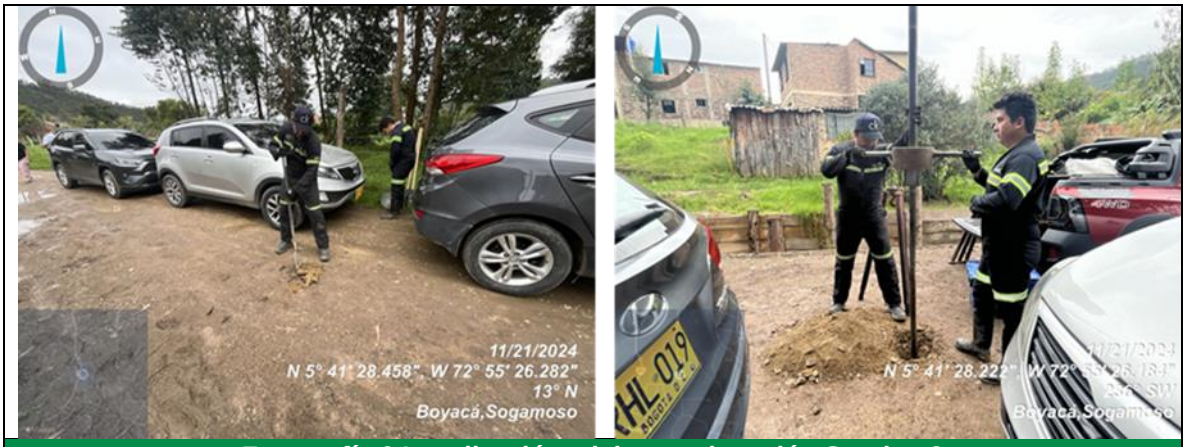
Desde la superficie hasta una profundidad de 1.50 m, se encuentra un material Areno-arcilloso de color café oscuro, en el que se observan cantos redondeados a subredondeados de tamaños heterométricos. A esta profundidad, se interrumpe la exploración debido a la presencia de cantos que dificultaron el hincado del equipo de perforación manual.

2.2.3.2 Sondeo 2

Ubicado en el punto referido con las coordenadas E: 1´127.796.25 N:1´121.209.25 el sondeo alcanzó una profundidad máxima de 3.00 m. Durante la ejecución del sondeo se adelantó la toma de muestras alteradas, la Fotografía 6 muestra el punto y actividades de muestreo durante la ejecución del sondeo.

La investigación del subsuelo en el sondeo N.2, alcanzo una profundidad máxima de exploración de 3.00 m. Actividad que permitió establecer mediante inspección visual la siguiente estratigrafía:

De la superficie y hasta alcanzar una profundidad de 0.90 m se establece de un relleno compuesto un recebo granular de color amarillo, desde esta profundidad y hasta la máxima profundidad de exploración 3.00 m se establece la presencia de un material areno-arcilloso de color café oscuro, en el que se observan cantos redondeados a subredondeados de tamaños heterométricos A esta profundidad, se interrumpe la exploración debido a la presencia de cantos que dificultaron el hincado del equipo de perforación manual.



Fotografía 6 Localización y labores ejecución Sondeo 2

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

2.2.3.3 Ensayos de laboratorio

Con el fin de obtener la información suficiente para la identificación de los diferentes niveles que conforman el perfil de cada Sondeo, en laboratorio, se seleccionaron las muestras y se determinaron los ensayos a ejecutar según normatividad INVE-.

Tabla 2. Ensayos de laboratorio realizados

Ensayo	Cantidad
Humedad natural	3
Límites de Atterberg	3
Granulometría	5
Corte Directo	1
Desgaste	2

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

Tabla 3. Ensayos de laboratorio realizados

ÍTEM	TIPO DE ANÁLISIS
1	Propiedades físicas (Humedad, Densidad, peso específico) ASTM D2216-71 - INVE 122-13 ASTM D2937-71 - INVE 146-13 ASTM D854-58 - INVE 128-13
2	Corte directo I.N.V. E – 154 – 13 ASTM D 3080 – 98 AASHTO T 236 – 03
3	Granulometría I.N.V. E – 123 – 07 - ASTM D 422-63 AASHTO T 88 00
4	Límites de Atterberg I.N.V. E – 125 – 13 AASHTO T 89-02 ASTM D 4318-00 / I.N.V. E – 126 – 13 AASHTO T 90-00 ASTM D 4318-00
5	Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5mm (1 %") por medio de la máquina de los ángeles con trituración I.N. V. E – 218 – 07/ 219-07- ASTM C 131 – 01 AASHTO T 96 – 02 UNE EN 1097 – ASTM C 535 -01 NTC 93

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

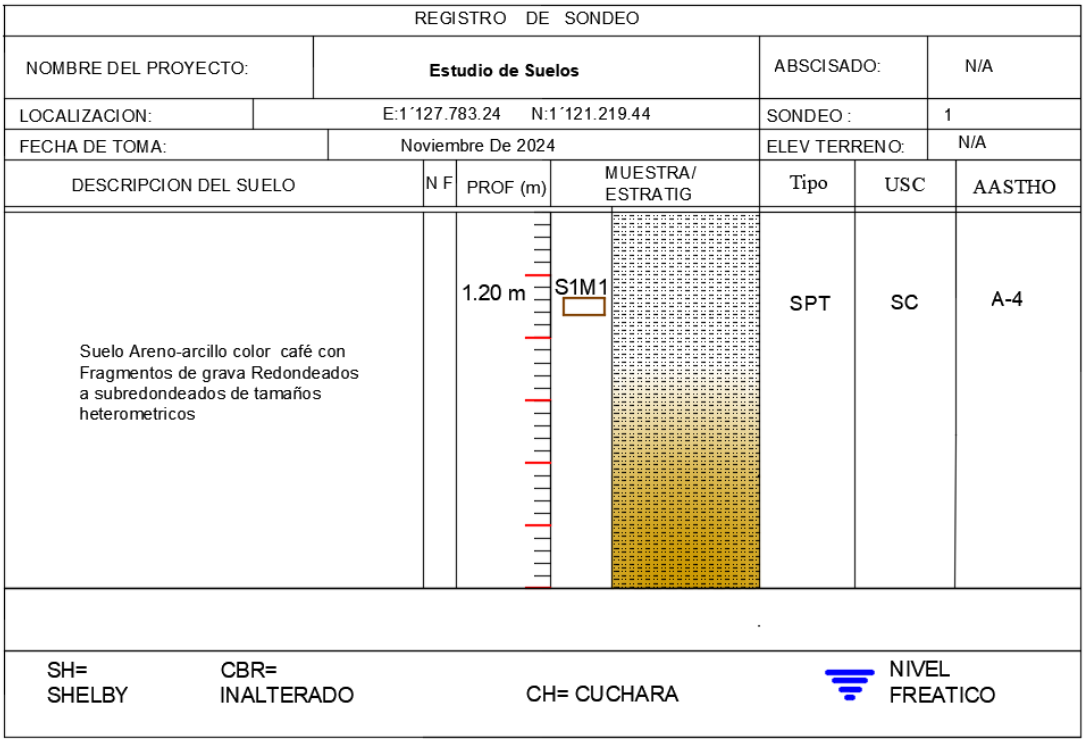
2.2.3.3.1 Resultados de laboratorio

Teniendo agrupados los resultados obtenidos a partir de la práctica de laboratorio (Ver ANEXO 2.2 RESULTADOS DE LABORATORIO), se procede a realizar el análisis, con el propósito de determinar los posibles comportamientos esperados del suelo para concretar el modelo geológico-geotécnico.

Teniendo en cuenta lo anterior se establece una secuencia homogénea en los 2 sectores donde se realizó la exploración directa al terreno distribuidas así: De la superficie y hasta alcanzar una profundidad de 0.90 m se establece de un relleno compuesto por un recebo granular de color amarillo, desde esta profundidad y hasta la máxima profundidad de exploración 3.00 m se establece la presencia de un material granular Areno-arcilloso color café oscuro con presencia de gravas redondeados a subredondeados de tamaños heterométricos con índice líquido y plástico promedio de 28.6 % y 19.0 % respectivamente, con una humedad promedio de 16.4 %, con porcentaje de pasa tamiz 200 de 35.6 % clasificado por la USC SC como. (Ver Figura 5 y Figura 6, y Tabla 4 y Tabla 5)

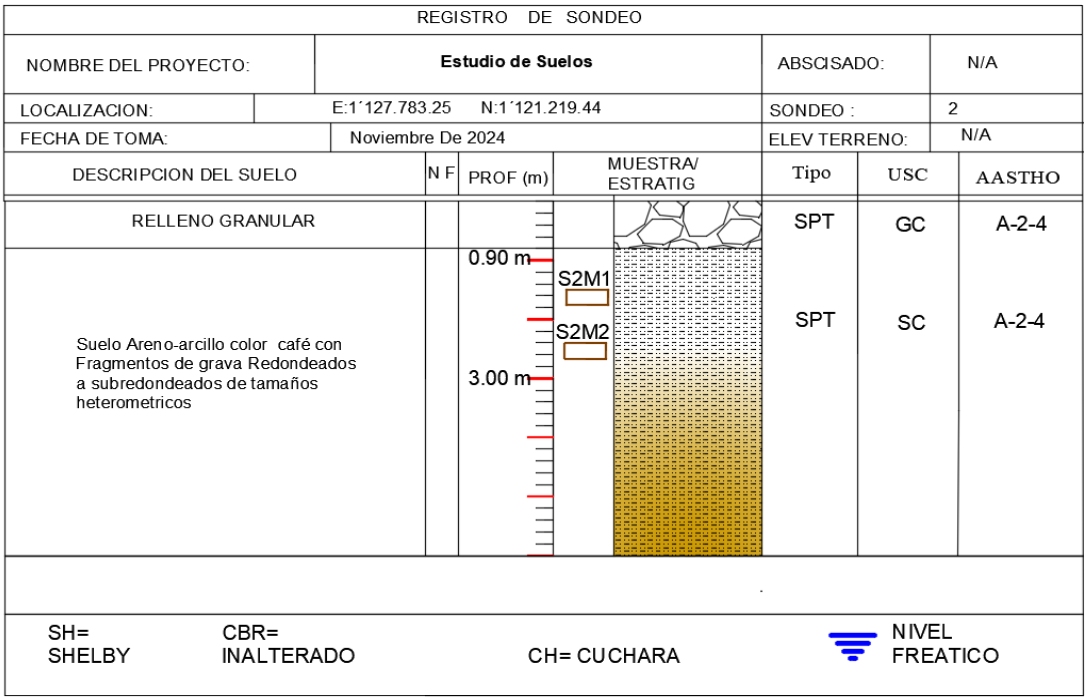
Durante la exploración, no se determinó la presencia de un nivel freático; sin embargo, la proximidad al afluente del río Molinero genera altos niveles de humedad en el terreno.

Figura 5. Perfil Sondeo 1



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

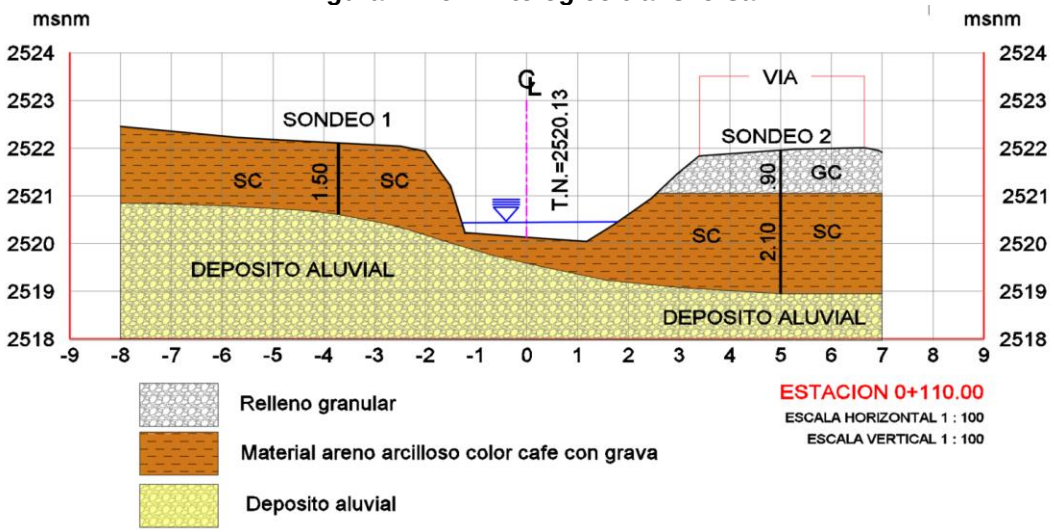
Figura 6. Perfil Sondeo 2



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

A continuación, se presenta el perfil litológico transversal de la estación 0+110. de los dos sondeos realizados según las profundidades de exploración. Se incluye también la correlación litológica entre ambos sondeos, así como las convenciones utilizadas en su elaboración.

Figura 7. Perfil litológico transversal



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

Tabla 4. Resumen de Propiedades Sondeo 1

ESTUDIO DE SUELOS Y GEOTECNICO																									
RESUMEN DE PROPIEDADES SONDEO 1																									
PERF	MUESTRA		N.F.	DESCRIPCION	Humedad equilibrio %	TIPO	Humedad natural %	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Indice de plasticidad %	IC	IL	Wn/LP	GRANULOMETRIA				TIPO DE SUELO	% GRAVA	% ARENA	% FINOS	PROF.(m)	Corte Directo		
	N.	PROF (m)									%	%	%	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	USC					γt(g/cm3)	ϕ (°)	Cu (Tn/m2)
S1	M1-M2	0,0-1,20		Suelo Areno-arcillo color café con Fragmentos de grava Redondeados a subredondeados de tamaños heterometricos	16,38	SPT	15,2	27,2	17,5	9,7	1,2	-0,2	0,9	73,36	68,68	51,82	43,46	SC	26,6	29,9	43,5	0,0-1,20			

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

Tabla 5. Resumen de Propiedades Sondeo 2

ESTUDIO DE SUELOS Y GEOTECNICO																									
RESUMEN DE PROPIEDADES SONDEO 2																									
PERF	MUESTRA		N.F.	DESCRIPCION	Humedad equilibrio %	TIPO	Humedad natural %	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Indice de plasticidad %	IC	IL	Wn/LP	GRANULOMETRIA				TIPO DE SUELO	% GRAVA	% ARENA	% FINOS	PROF.(m)	Corte Directo		
	N.	PROF (m)									%	%	%	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	USC					γt(g/cm3)	ϕ (°)	Cu (Tn/m2)
S2		0,0-0,90		Relleno Granular	14,69	SPT	21,8	23,6	14,2	9,4	0,2	0,8	1,5	35,40	30,54	22,43	17,43	GC	64,6	18,0	17,4	0,0-0,90	2,05	27	2
	M1-M2	0,90-3,0		Suelo Arcillo color café con Fragmentos de grava Redondeados a subredondeados de tamaños heterometricos	17,7	SPT	17,6	30,0	20,5	9,5	1,3	-0,3	0,9	64,06	56,85	36,77	27,74	SC	35,9	36,4	27,7	0,90-3,0	1,8	20,2	2,5

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

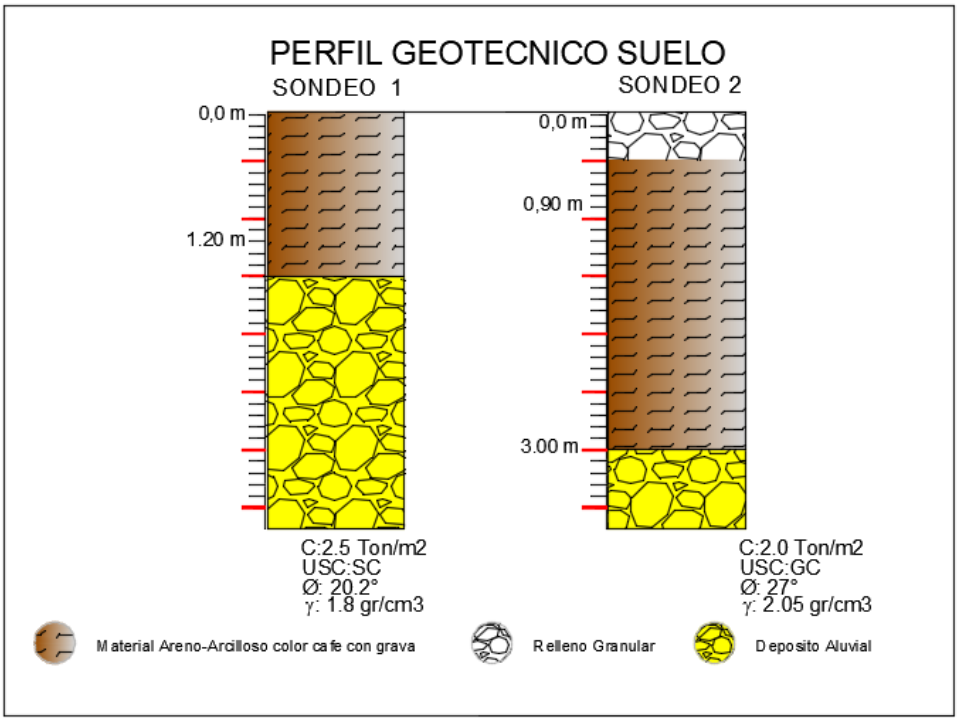
2.2.3.3.2 Caracterización geotécnica

La historia geológica del perfil de suelo explorado permite clasificarlo como un material Areno-arcilloso, estos materiales se encuentran sobre consolidados, es decir, que durante el tiempo actual han soportado cargas de tipo permanente y transitorio. La composición de los materiales encontrados en la exploración geotécnica es del tipo Fino-Granular, de acuerdo con la clasificación unificada de suelos USCS, el perfil explorado pertenece al grupo SC y presenta una plasticidad Baja y consistencia Baja.

Con base en el porcentaje Saturación >80% que presenta el horizonte se determina que el perfil de suelo tiene una humedad media y a partir de la relación de Humedad Natural – Limite de Plasticidad (<1), se establece que el horizonte presenta ligeros niveles de consolidación y un estado natural plástico.

A partir de los resultados obtenidos del ensayo de SPT establece para la secuencia de suelo analizado un peso unitario húmedo de 1.80 Gr/cm3 una cohesión de 2.5 Ton/m2 y un ángulo de fricción interna de 20.2° Para el Suelo Natural un peso unitario húmedo de 2.05 Gr/cm3 una cohesión de 2.0 Ton/m2 y un ángulo de fricción interna de 27° y por último para el depósito coluvial se establece un peso unitario húmedo de 1.91 Gr/cm3 una cohesión de 1.0 Ton/m2 y un ángulo de fricción interna de 26°.

Figura 8. Perfil Geológico Geotécnico área de estudio



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

CLASIFICACION USCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).
SC: Arena-arcillosa con grava
GC:Grava Mal Graduada con Arcilla

2.2.4 Muestreo en el lecho del cauce

Para comprender las características y la dinámica fluvial del cauce, se llevaron a cabo dos muestreos en diferentes puntos. Las muestras recolectadas fueron enviadas al laboratorio para su análisis correspondiente. (Ver Figura 3 y Fotografía 7)



Fotografía 7 Procedimiento de Muestreo

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. (ANEXO 2.1 INFORME ESTUDIO DE SUELOS)

Se realizaron ensayos de granulometría y desgaste a estas muestras, obteniendo como resultado una clasificación USCS de GP y GW. Además, se registraron valores de desgaste del 29.42%.

2.3 ESTUDIO HIDROLÓGICO

Para la estimación de los caudales de diseño, se realiza el análisis de las condiciones hidrológicas de las cuencas relacionadas con las corrientes de agua que tienen influencia directa sobre el punto a intervenir, así como las escorrentías provenientes de predios adyacentes de la propia calzada vial.

2.3.1 Metodología

Para el análisis hidrológico, se desarrollan los siguientes ítems:

- Caracterización climática
- Delimitación de la cuenca y determinación de sus parámetros morfométricos
- Cálculo de caudales de diseño
- Hidrograma de diseño

2.3.2 Caracterización climatológica

Para el análisis climático del área de interés, se obtuvo de la página del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) del portal de datos abiertos DHIME el archivo en formato (.xls) “Copia de Promedios Climatológicos”, que resume los valores medios mensuales multianuales a nivel diario, tomando como fuente de análisis las estaciones más cercanas al sitio de interés, adicionalmente, se obtuvo las series de precipitación máxima en 24 hrs. (Ver Tabla 6)

Tabla 6. Estaciones hidroclimatológicas adoptadas para el análisis climatológicas.

Estación	Fecha inicio Datos	Fecha fin Datos	Latitud	Longitud	Localización al proyecto (Km)	Útil para diseño
AEROPUERTO A LLERAS C AUT [24035340]	31/12/1993	1/01/2024	5.676	-72.967	5.15	SI
SENA [24030940]	31/12/1993	1/01/2024	5.756	-72.907	7.1	SI

Fuente: IDEAM, 2024.

Para la generación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se utilizan las series de registros de precipitación máxima en 24 horas con ventanas temporales de los años 1994 – 2024 para la estación AEROPUERTO A LLERAS C AUT (24035340) (Ver Figura 3). Se hace la claridad de que en la zona existen diferentes estaciones climatológicas monitoreadas por el IDEAM en los municipios aledaños en el área de Sogamoso, sin embargo, no cuentan con una disponibilidad de datos de al menos 20 años consecutivos para poder determinar un análisis adecuado, la estación de AEROPUERTO A LLERAS tiene datos en una serie de tiempo y nivel de aceptación ideal para establecer datos en la elaboración de curvas IDF. Basado en lo anterior las demás estaciones se descartan en el análisis hidrológico desde el punto de vista de localización, disponibilidad de datos a nivel multianual y nivel de aceptación del IDEAM.

Figura 9. Localización estaciones IDEAM cerca al sitio de estudio



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. Imagen base de Google Earth.

2.3.2.1 Curva IDF (ver ANEXO 3.1.2.1 Curva IDF)

De acuerdo con los datos de precipitaciones registrados en las zonas de interés cercanas a la ubicación del tramo del río Molinero objeto de estudio, y tomando en cuenta las condiciones climáticas de la región, se procedió a elaborar las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) correspondientes a los diferentes períodos de retorno. Estas curvas son fundamentales para la estimación de los caudales de diseño. El proceso de elaboración de las curvas IDF se basó en las precipitaciones históricas y proyectadas para la zona, considerando variables como la topografía local, el uso del suelo y los patrones meteorológicos predominantes. Con estos datos, se obtuvieron los caudales de diseño necesarios para la evaluación hidráulica del cauce.

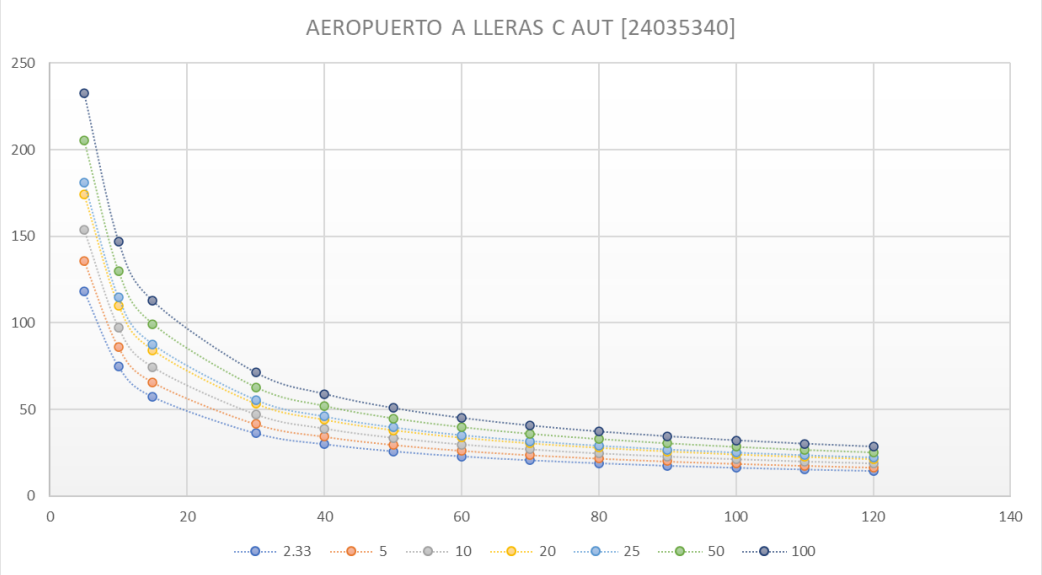
Las curvas IDF se elaboraron a partir de los datos registrados en la estación Aeropuerto A. Lleras C Aut. (24035340), obteniendo como resultado lo mostrado en la Figura 10 y Tabla 7.

Tabla 7. Valores de Intensidad en la Estación Aeropuerto a Lleras C AUT [24035340].

AEROPUERTO A LLERAS C AUT [24035340]													
T (años)	t (min)												
	5	10	15	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
2.33	110.83	70.14	53.67	33.97	28.09	24.25	21.50	19.42	17.78	16.45	15.35	14.41	13.61
5	127.16	80.48	61.58	38.97	32.23	27.82	24.67	22.28	20.40	18.87	17.61	16.53	15.61
10	144.06	91.17	69.77	44.15	36.52	31.52	27.94	25.24	23.11	21.38	19.95	18.73	17.68
20	163.20	103.29	79.04	50.02	41.37	35.70	31.66	28.59	26.18	24.22	22.60	21.22	20.03
25	169.89	107.52	82.28	52.07	43.07	37.17	32.95	29.77	27.26	25.22	23.52	22.09	20.86
50	192.47	121.81	93.21	58.99	48.79	42.11	37.33	33.72	30.88	28.57	26.65	25.02	23.63
100	218.04	137.99	105.59	66.83	55.27	47.70	42.29	38.20	34.98	32.36	30.19	28.35	26.77

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

Figura 10. Curva IDF de función de intensidad vs tiempo con periodos de retorno en la estación Aeropuerto a Lleras C AUT [24035340].



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.3.3 Delimitación de la cuenca del rio Molinero

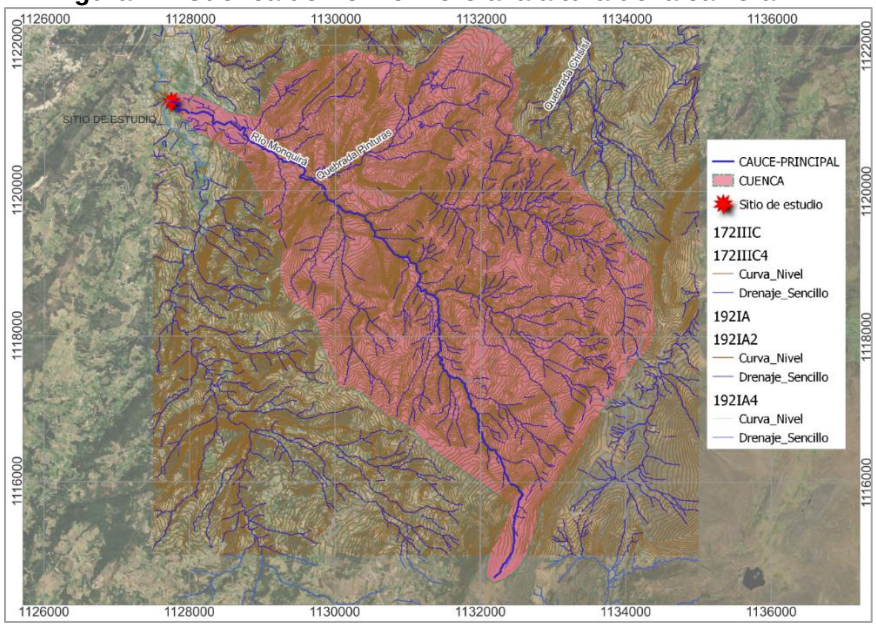
Se denomina cuenca a un área cuyas aguas afluyen todas a un mismo punto. Las características topográficas, geológicas y fitográficas de una cuenca definen su comportamiento hidrológico, y conjuntamente con las características climáticas de la región permiten valorar los derrames de agua producidos por las precipitaciones pluviales. Cada cuenca está separada de las que la rodean por una línea denominada divisoria de aguas.

Las condiciones geológicas y edafológicas de la cuenca tienen una notable influencia en la integración de los caudales de derrame, los terrenos superficiales y permeables permiten infiltrar gran parte de la precipitación y consecuentemente proveen un bajo caudal de derrame, en cambio, los suelos de escasa permeabilidad dejan escurrir la casi totalidad del agua precipitada. Es evidente la importancia de un detallado conocimiento de las condiciones geológicas y edafológicas de una cuenca para lograr una correcta evaluación de sus características hidrológicas.

La cobertura vegetal de una cuenca condiciona las cualidades del escurrimiento superficial, su incidencia responde a cuatro efectos: interceptación de la lluvia hasta la saturación de las hojas y ramas, Aumento de la evaporación, dispersión de las gotas de lluvia reduciendo el proceso erosivo en la cuenca, por último, fijación del suelo reduciendo el proceso erosivo en la cuenca (Cornero, 1996).

Las áreas de drenaje deben ser determinadas por medición directa en planos topográficos, y su delimitación debe ser consistente con las redes de drenaje natural. Para la delimitación de cuencas se utilizó la información de cartografía básica a escala 1:10.000 de las planchas 172IIIC4, 192IA2 y 192IA4 publicadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), que igualmente permitieron la delimitación de las líneas divisorias de aguas y el área tributaría para el río Molinero a la altura del tramo de estudio (24,33 km2).

Figura 11. Cuenca de río Molinero a la altura de la carrera 4A.



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.3.3.1.1 Parámetros morfométricos de la cuenca del rio Molinero

Con esta delimitación se pueden conocer aspectos morfométricos de la cuenca de interés, características morfométricas para el modelo hidráulico.

- Área

24.327.880,74 m2
24.33 km2

Como la Cuenca es menor a 100km2 se trabajará con el modelo HEC-HMS hidrograma unitario sintético SCS

- Perímetro

23.658,465 m
23.658 km

- Longitud de cauce principal

10.651m
10.6km

- Desnivel

3.700 msnm -2.525msnm=1.175m

- Tiempo de Concentración (Ver ANEXO 3.1.2.2 Caracterización cuenca)

Tabla 8. Cálculo de tiempo de concentración para la cuenca del río Molinero

Datos de Entrada Cuenca										
n (manning)	0.03		Área	24.33	Km²	Desnivel	1170	m		
CN	73		Long. Cauce	10651	m	I	45	(mm/Hr)		
C	0.52									
Cálculo del tiempo de concentración, Tc (hrs)										
Temez	1.15	Johnstone-Cross (RB)	2.62	V.T.Chow (RB)	3.74	FAA	1.46	Kirpich (RB)	1.24	
Ventura-Heras (RB)	1.88	Giandotti (RB)	1.30	US Army (RB)	1.75	Onda Cinemática	1.57			
Williams (RB)	1.16	SCS-Ranger	0.96	Hathaway	0.60	SCS (RB)	3.37			
Valor seleccionado de Tc (mediana)				105.3	min	Velocidad media de flujo			1.69	m
				1.75	hrs					s

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.3.4 Cálculo de caudales

A continuación, se describen los temáticos y os cálculos utilizados para el cálculo de caudales a diferentes periodos de retorno.

2.3.4.1.1 Suelo y cobertura (Ver ANEXO 3.1.2.2 Caracterización cuenca)

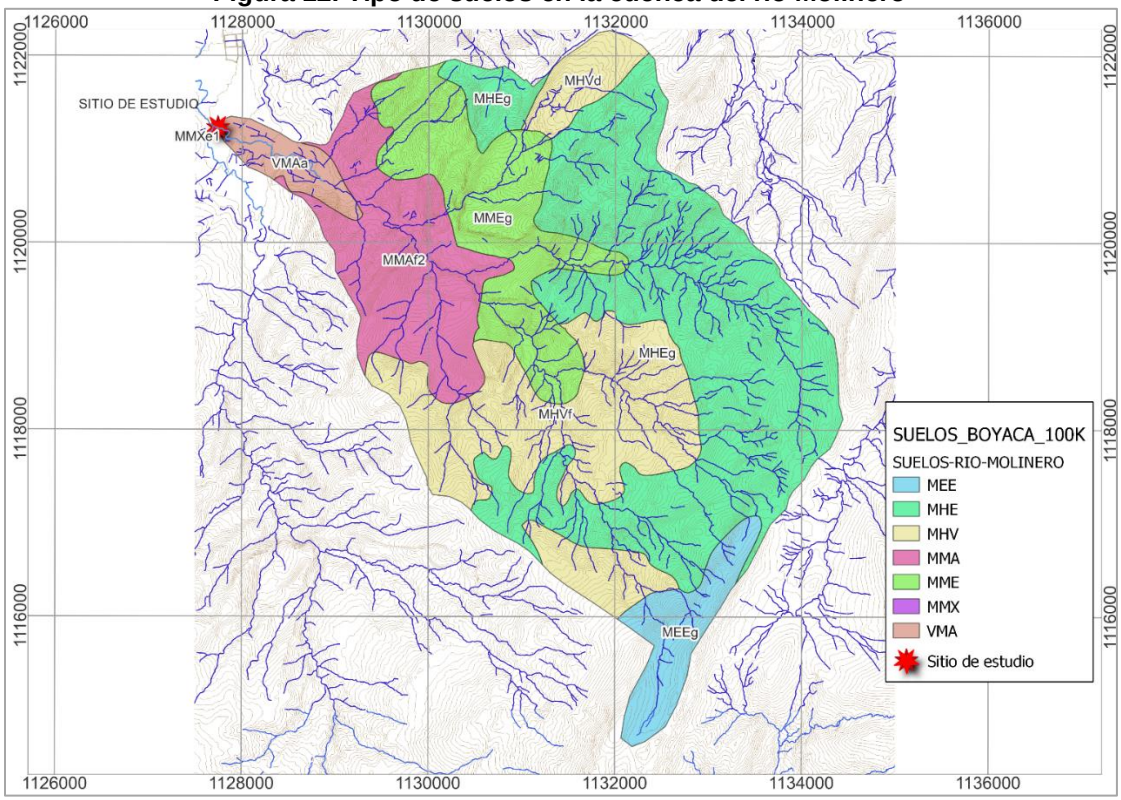
Un aspecto crucial en este tipo de modelos es la elección del Número de Curva, ya que este valor representa las características del suelo y cobertura de la superficie de la cuenca, factores que llevan a estimar las pérdidas de escorrentía inicial, perdidas que influencian el hidrograma de los eventos para los diferentes periodos de retorno.

La metodología utilizada para la estimación de este parámetro se basa en información del IGAC e IDEAM los cuales presentan dicha información, con escalas 1:100.000.

- Suelos (Clases Agrologicas)
- Cobertura (Corine Land Cover)

En la Figura 12 se presenta la distribución espacial del tipo de suelos que conforman la cuenca y en la Tabla 10 la información tabulada.

Figura 12. Tipo de suelos en la cuenca del río Molinero



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024, con base en IGAC

Para cada tipo de suelos debe asignarse una categoría de suelos, dependiendo de su capacidad de infiltración, que está ligado a las características del suelo. En la Tabla 9 se describen el tipo de suelos, su categoría y sus características principales.

Tabla 9. Grupos texturales de suelos (CN) con el drenaje natural.

TIPOS DE SUELOS NÚMERO DE CURVA (CN)		
Categoría**	Descripción	Tasas de infiltración (mm.h-1)
A	Arenas profundas, loes, Limos agregados;	7,62 – 11,43
B	Loes superficial, Suelos franco-arenoso	3,81 – 7,62
C	Suelos franco-arcillosos, franco- arenoso superficiales, bajos en materia orgánica, y usualmente altos en arcilla	1,27- 3,81
D	Suelos que escurren muy bien, arcillas plásticas pesadas, y ciertos suelos salinos	0 – 1,27

Fuente: Feldman, 2000

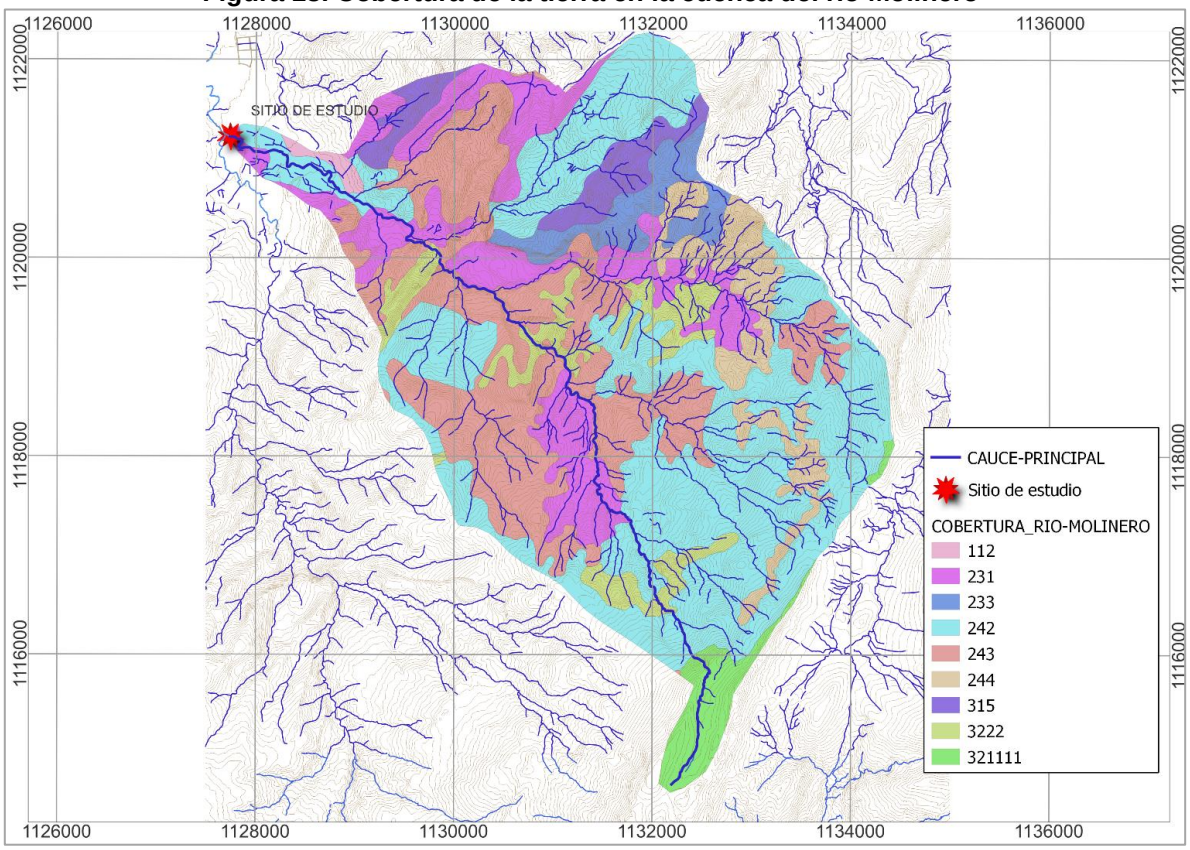
Tabla 10. Grupos texturales de suelos (CN) para la cuenca del río Molinero

ID	UCS	UCS_F	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	ÁREA (m2)	%	CAT
1	VMA	VMAa	Relieve plano con pendientes 0-1%, frecuentemente encharcables; suelos moderadamente profundos y muy superficiales, imperfecto y muy pobremente drenados, texturas finas, reacción extremadamente ácida y moderadamente alcalina, algunos suelos con saturación	679894.116	2.80%	D
2	MMX	MMXe1	Relieve ligero a fuertemente quebrado, con pendientes 7-12%, 12-25% y 25-50%; afectados por movimientos en masa, (solifluxión) terracetas, reptación y erosión hídrica en grado ligero; suelos superficiales, limitados por contenidos tóxicos de aluminio	3909.741	0.02%	C
3	MME	MMEg	Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado, pendientes predominantes 25-75%; afectados por movimientos en masa (pata de vaca), erosión hídrica, ligera a moderada. Los suelos son superficiales a moderadamente profundos, bien drenados	3494976.748	14.37%	B
4	MMA	MMAf2	Relieve moderado a fuertemente escarpado, con pendientes superiores al 12-75%, localmente mayores, afectados por escurrimiento difuso en grado ligero y pedregosidad superficial; suelos moderadamente profundos a superficiales, bien drenados.	3345476.685	13.75%	B
5	MHV	MHVd	Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado, con pendientes 12-25%, 25-50% y 50-75%, hay evidencia de movimientos en masa (pata de vaca) afectados en sectores por fragmentos de roca en superficie; suelos muy superficiales por saturación	717768.344	2.95%	C
6	MHV	MHVf	Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado, con pendientes 12-25%, 25-50% y 50-75%, hay evidencia de movimientos en masa (pata de vaca) afectados en sectores por fragmentos de roca en superficie; suelos muy superficiales por saturación	4908657.834	20.18%	C
7	MHE	MHEg	Relieve moderado y fuertemente escarpado, con pendientes superiores al 50%, suelos físicamente sin limitantes en su profundidad, pero químicamente superficiales por presentar saturación de aluminio mayor del 75%, bien drenados, de texturas medias.	562465.399	2.31%	A

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024, con base en IGAC y Feldman, 2000

Para determinar la cobertura de la cuenca se empleó los mapas del Corine Land Cover). Ver Figura 13, mientras que en la Tabla 11 se relaciona cada unidad de cobertura y su correspondiente Numero de Curva asociado.

Figura 13. Cobertura de la tierra en la cuenca del río Molinero



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

Tabla 11. Valores de Curva Número para unidades de cobertura y grupos de suelos.

Descripción de las Unidades de Cobertura		Grupos texturales de suelos (CN)			
Código	**Unidad**	**A**	**B**	**C**	**D**
111	Tejido urbano continuo	98	98	98	98
112	Tejido urbano discontinuo	77	86	91	94
121	Zonas industriales o comerciales	85	90	92	94
124	Aeropuertos	98	98	98	98
125	Obras hidráulicas	98	98	98	98
131	Zonas de extracción minera	96	96	96	96
142	Instalaciones recreativas	49	69	79	84
211	Otros cultivos transitorios	74	83	88	90
231	Pastos limpios	68	79	86	89
232	Pastos arbolados	49	69	79	84
233	Pastos enmalezados	39	61	74	80
241	Mosaico de cultivos	67	78	85	89
242	Mosaico de pastos y cultivos	68	79	86	89

243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	49	69	79	84
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	39	61	74	80
245	Mosaico de cultivos y espacios naturales	39	61	74	80
314	Bosque de galería y ripario	30	55	70	77
315	Plantación forestal	45	66	77	83
323	Vegetación secundaria o en transición	36	60	73	79
332	Afloramientos rocosos	98	98	98	98
333	Tierras desnudas y degradadas	96	96	96	96
334	Zonas quemadas	96	96	96	96
411	Zonas pantanosas	90	90	90	90
413	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	95	95	95	95
511	Ríos (50 m)	98	98	98	98
512	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	98	98	98	98
514	Cuerpos de agua artificiales	98	98	98	98
2121	Arroz	77	86	91	94
2131	Algodón	67	78	85	89
2222	Café	62	71	78	81
2231	Otros cultivos permanentes arbóreos	62	71	78	81
3131	Bosque fragmentado con pastos y cultivos	43	65	76	82
3132	Bosque fragmentado con vegetación secundaria	32	58	72	79
3221	Arbustal denso	30	48	65	73
3222	Arbustal abierto	48	67	77	83
3232	Vegetación secundaria baja	35	56	70	77
3311	Playas	49	68	79	84
3312	Arenales	55	72	81	86
31111	Bosque denso alto de tierra firme	30	55	70	77
31121	Bosque denso bajo de tierra firme	45	66	77	83
31122	Bosque denso bajo inundable	36	60	73	79
32111	Herbazal denso de tierra firme	41	62	74	85
32121	Herbazal abierto arenoso	63	77	85	88
32122	Herbazal abierto rocoso	55	72	81	86
32221	Arbustal abierto esclerófilo	49	68	79	84
321111	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	41	62	74	85
321112	Herbazal denso de tierra firme arbolado	41	62	74	85
321113	Herbazal denso de tierra firme con arbustos	41	62	74	85

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024,

Comprendiendo la cuenca se compone de vario grupos texturales (A, B y C) en función de las características del suelo (IGAC) se puede ponderar el CN para la cuenca de interés en función de las características de cobertura (CORINE LAND COVER), encontrando así que el CN más representativo para la cuenca es 68. Ver Tabla 12.

Tabla 12. Definición Numero de Curva para la Cuenca del río Molinero.

CODIGO	USO DE SUELO	AREA (HA)	TIPO DE SUELO	% ÁREA	CN PONDERADO
3222	Arbustal Abierto	22.49	B	0.92%	0.52
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	29.19	B	1.20%	0.83
242	Mosaico de pastos y cultivos	69.23	B	2.85%	2.13
3222	Arbustal Abierto	3.40	B	0.14%	0.08
231	Pastos limpios	13.31	B	0.55%	0.43
242	Mosaico de pastos y cultivos	19.06	B	0.78%	0.59
231	Pastos limpios	3.38	B	0.14%	0.11
112	Tejido urbano discontinuo	2.30	B	0.09%	0.07
231	Pastos limpios	38.83	B	1.60%	1.24
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	93.57	B	3.85%	2.65
231	Pastos limpios	22.33	B	0.92%	0.72
231	Pastos limpios	3.81	B	0.16%	0.12
315	Plantación forestal	13.65	B	0.56%	0.29
231	Pastos limpios	5.33	C	0.22%	0.19
242	Mosaico de pastos y cultivos	66.44	C	2.73%	2.24
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	5.84	B	0.24%	0.17
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.17	B	0.01%	0.00
242	Mosaico de pastos y cultivos	47.45	B	1.95%	1.46
321111	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	72.41	B	2.98%	1.67
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1.26	A	0.05%	0.03
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	9.32	A	0.38%	0.19
231	Pastos limpios	43.91	A	1.80%	1.23
242	Mosaico de pastos y cultivos	1.75	A	0.07%	0.05
315	Plantación forestal	0.01	A	0.00%	0.00
231	Pastos limpios	23.18	A	0.95%	0.65
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.04	A	0.00%	0.00
3222	Arbustal Abierto	35.21	A	1.45%	0.58
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	47.22	A	1.94%	0.95
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	37.10	A	1.53%	0.75
231	Pastos limpios	51.15	A	2.10%	1.43
3222	Arbustal Abierto	1.08	A	0.04%	0.02
321111	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	3.68	A	0.15%	0.06
3222	Arbustal Abierto	17.76	A	0.73%	0.29

243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	55.40	A	2.28%	1.12
233	Pastos enmalezados	75.87	A	3.12%	2.12
315	Plantación forestal	52.57	A	2.16%	0.78
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	103.32	A	4.25%	2.08
242	Mosaico de pastos y cultivos	430.28	A	17.69%	11.32
321111	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	1.72	A	0.07%	0.03
231	Pastos limpios	11.82	B	0.49%	0.38
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	19.86	B	0.82%	0.56
3222	Arbustal Abierto	2.86	B	0.12%	0.07
231	Pastos limpios	14.74	B	0.61%	0.47
3222	Arbustal Abierto	24.98	B	1.03%	0.58
231	Pastos limpios	1.45	B	0.06%	0.05
231	Pastos limpios	0.43	B	0.02%	0.01
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	121.98	B	5.01%	3.46
233	Pastos enmalezados	17.19	B	0.71%	0.55
315	Plantación forestal	6.82	B	0.28%	0.15
231	Pastos limpios	15.64	B	0.64%	0.50
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	0.32	B	0.01%	0.01
231	Pastos limpios	31.16	B	1.28%	1.00
242	Mosaico de pastos y cultivos	62.27	B	2.56%	1.92
315	Plantación forestal	17.97	B	0.74%	0.38
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3.01	D	0.12%	0.11
242	Mosaico de pastos y cultivos	36.75	D	1.51%	1.30
231	Pastos limpios	13.82	D	0.57%	0.51
112	Tejido urbano discontinuo	10.24	D	0.42%	0.37
231	Pastos limpios	4.17	D	0.17%	0.15
231	Pastos limpios	0.39	C	0.02%	0.01
231	Pastos limpios	52.96	C	2.18%	1.87
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	77.98	C	3.21%	2.50
3222	Arbustal Abierto	4.35	C	0.18%	0.13
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	0.75	C	0.03%	0.02
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.23	C	0.01%	0.01
242	Mosaico de pastos y cultivos	9.77	C	0.40%	0.33
3222	Arbustal Abierto	4.71	C	0.19%	0.14
3222	Arbustal Abierto	22.23	C	0.91%	0.64
3222	Arbustal Abierto	1.28	C	0.05%	0.04
243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	113.01	C	4.65%	3.62

244	Mosaico de pastos con espacios naturales	0.43	C	0.02%	0.01
242	Mosaico de pastos y cultivos	203.15	C	8.35%	6.85
NUMERO DE CURVA (CN) PARA CONDICIÓN NORMAL					68

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024

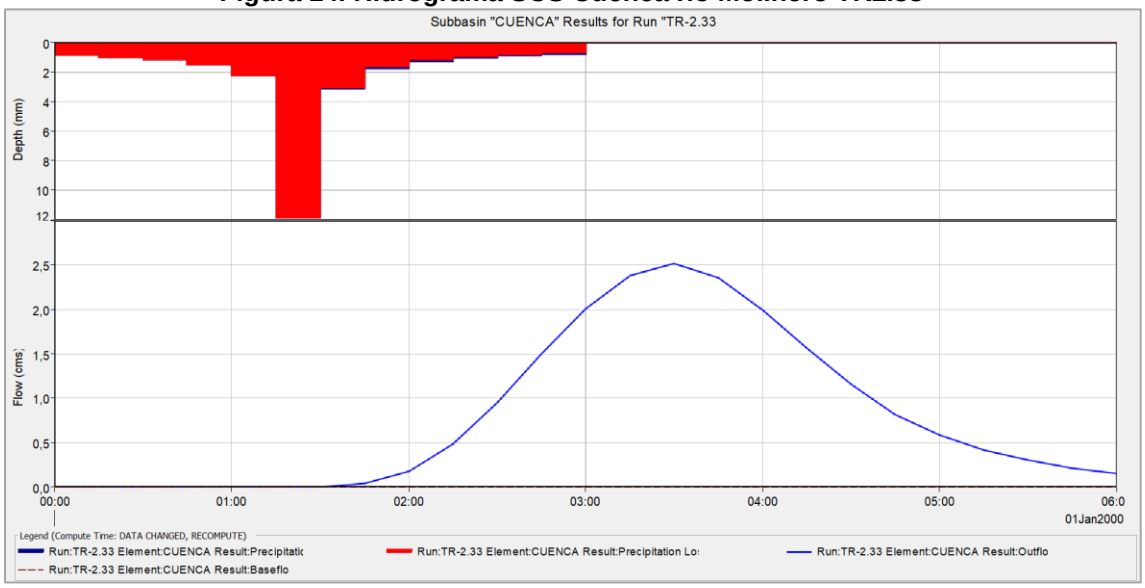
Es importante señalar que el CN hasta ahora estimado corresponde a la condición normal del suelo, sin considerar una corrección por saturación y por la pendiente media de la cuenca. Luego de considerar una condición de saturación del suelo y hacer corrección por la pendiente media del cauce el valor de CN asignado a la cuenca del río Molinero hasta el sitio de estudio es de 73. (Ver ANEXO 3.1.2.3 Tormenta de diseño)

2.3.5 Hidrogramas de diseño (Ver ANEXO 3.1.2.4 Modelo lluvia escorrentia)

Para la estimación de las crecientes máximas se elaboró un modelo lluvia escorrentía en el software HEC-HMS 4.12 (Hydrologic Modeling System, del U.S. Army Corps of Engineers). Este paquete computacional integra varias metodologías de cálculo de crecientes para el diseño hidrológico que incluye los métodos de hidrogramas sintéticos del SCS, Snyder y Clark.

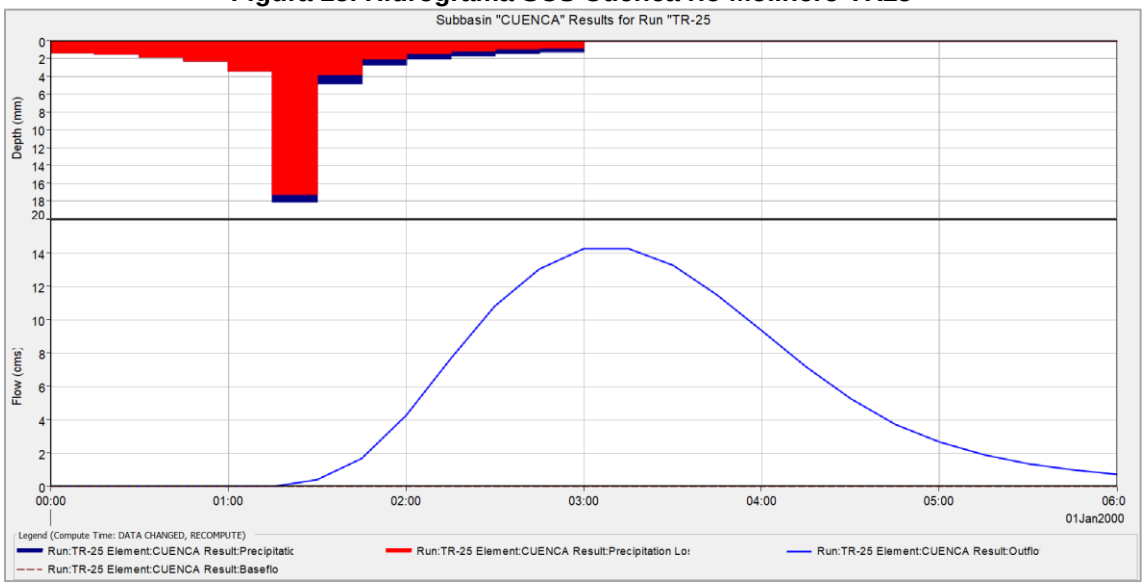
Se elabora el modelo para el método de transformación del SCS, para diferentes periodos de retorno. En la Figura 14 se muestra el hidrograma resultante del modelo para un periodo de retorno de 2.33 años, en la Figura 15 el resultado para un periodo de retorno de 25 años y en la Figura 16 para un periodo de retorno de 50 años.

Figura 14. Hidrograma SCS Cuenca río Molinero TR2.33



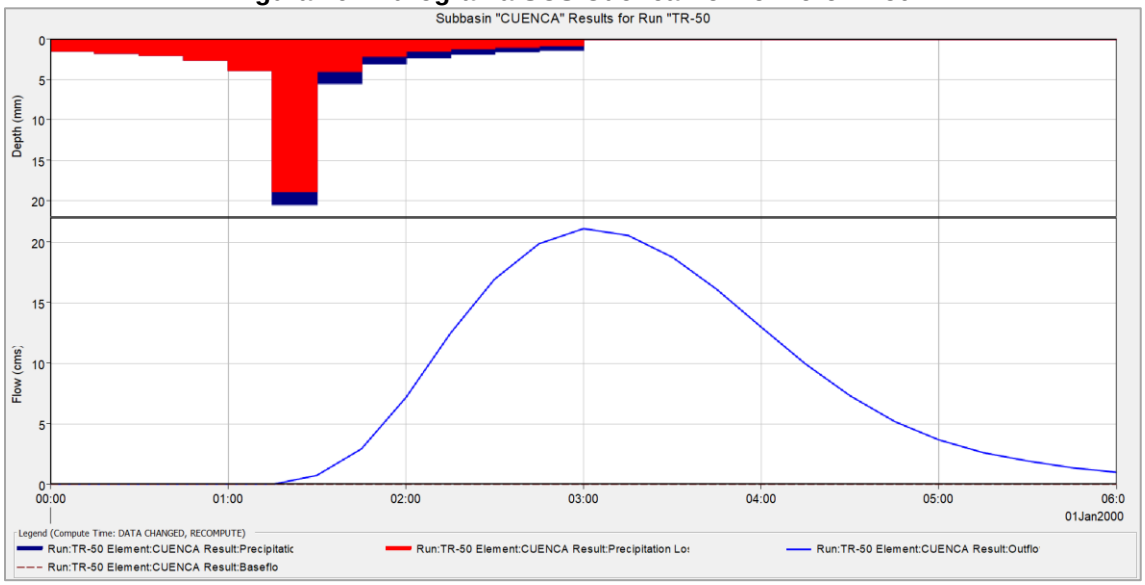
Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

Figura 15. Hidrograma SCS Cuenca río Molinero TR25



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

Figura 16. Hidrograma SCS Cuenca río Molinero TR50



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

Tabla 13. Caudales de diseño para estudio hidráulico del río Molinero en el K18

Cuenca	Área (Km^2)	Caudal (m^3/s)		
		tr=2,33	tr=25	tr=50
Río Molinero	24.33	2.50	14.3	21.1

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.4 ESTUDIO HIDRÁULICO

El estudio hidráulico del río Molinero a la altura del K18 tiene como propósito la determinación de los niveles máximos y velocidades de flujo; estos brindan una aproximación del comportamiento del cauce para el cálculo de la socavación y el diseño de obras de protección.

Se desarrolló un modelo hidráulico unidimensional del río, en la zona de estudio, para la condición actual, mediante el software HEC-RAS versión 6.6, utilizando el módulo de flujo permanente. Para la modelación hidráulica se utiliza la información de los caudales máximos obtenidos del estudio hidrológico, la información obtenida de las prospecciones en campo, incluyendo la batimetría del cauce, la topografía de la orilla, características del suelo obtenidas de la exploración del subsuelo, así como la rugosidad del cauce, estimada a través del coeficiente de rugosidad de Manning.

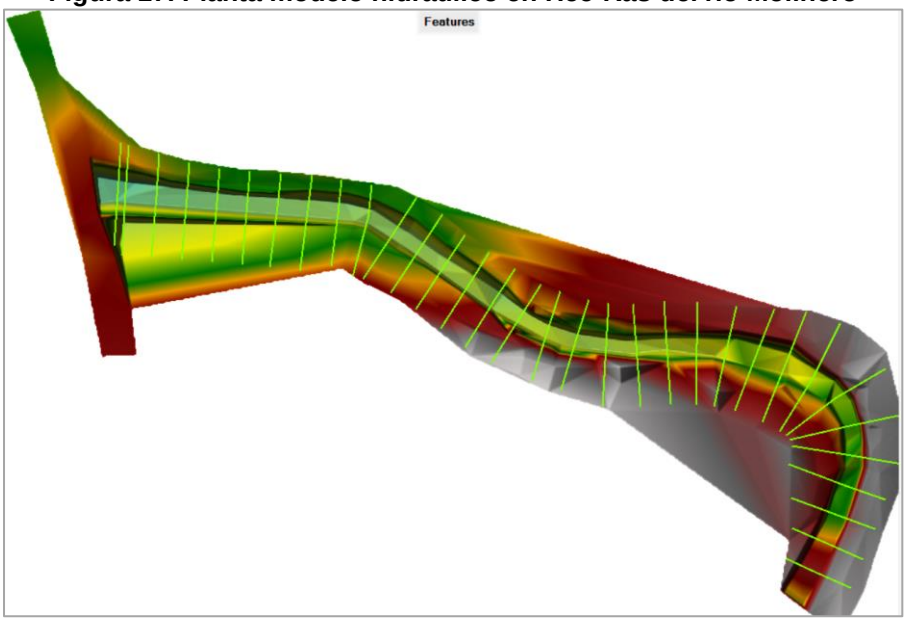
2.4.1.1 Descripción del modelo (Ver ANEXO 3.1.3 MODELO HIDRÁULICO)

Se adoptó el uso de un modelo bidimensional (2D) ya que se asume que la dimensión longitudinal prevalece sobre las otras dos en el cauce estudiado. El modelo está constituido por una topología que se compone por un alineamiento y una serie de secciones transversales las cuales están asociadas a unas condiciones de flujo.

El alineamiento se traza sobre el canal principal del río Molinero, el cual está orientado por la línea formada aproximadamente por los puntos medios entre las bancas del cauce. Sobre el alineamiento se generan secciones transversales con una separación de 5,0m, las cuales se extienden hasta los límites la superficie del terreno generado a partir de los levantamientos topográficos y batimétricos. Mediante el software, se asignan los puntos de banca, los coeficientes de rugosidad de Manning y se ajustan las distancias entre bancas.
Como condición de frontera de entrada se define el ingreso de los caudales de diseño bajo régimen permanente. En el límite de aguas abajo se asume que el flujo es uniforme, para esto se elige una condición de profundidad normal y se ingresa el valor de la pendiente media del río, la cual es aproximadamente la pendiente de la línea de energía.

En la Figura 17, se presenta una vista en planta de la configuración del modelo hidráulico elaborado para el río Molinero en la zona de estudio

Figura 17. Planta modelo hidráulico en Hec-Ras del río Molinero



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024, con base en HEC-RAS

2.4.1.2 Coeficiente de rugosidad de Manning (Ver ANEXO 3.1.3 MODELO HIDRÁULICO

El coeficiente de rugosidad de Manning se estima a través del método de Cowan (1956). El método asigna un valor de rugosidad según los principales factores primarios que afectan el movimiento del río, como son: las características del material del cauce, las irregularidades de la superficie, las variaciones de la sección transversal, la presencia de obstáculos, la vegetación y la sinuosidad del cauce, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{n} = (n0 + n1 + n2 + n3 + n4)\, n5$$

Donde:

n0 = características del material del cauce
n1 = grado de irregularidad de la superficie
n2 = variaciones de la sección transversal
n3 = presencia de obstáculos
n4 = presencia de vegetación
n5 = factor de sinuosidad del cauce

Para la definición del material que compone el lecho del cauce se tomaron muestras de suelo mediante la ejecución de dos apiques, a los cuales se les practicó una caracterización del material, en la cual se obtuvo el valor medio de las partículas del lecho (D50) encontrado que es de 27,29mm.

En la observación de las características del cauce del río Molinero en el sector, que luego fueron comparadas con las que aparecen tabuladas en la “Guía para seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning para canales naturales y planicies de inundación” elaborada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USGS). En la

Tabla 14 se presentan los valores del coeficiente de rugosidad de Manning adoptados para el río Molinero en el tramo de estudio.

Tabla 14. Coeficiente de rugosidad n de Manning para el Cauce del río Molinero

Factor	Descripción del Factor	Valor recomendado de n	Valor seleccionado
Material del fondo del cauce	Suelo fino	0.020	0.028
	Roca	0.025	
	Arena o Grava fina	0.024	
	Grava Gruesa	0.028	
Irregularidad del fondo del cauce	No hay irregularidades	0.000	0.003
	Irregularidades menores	0.005	
	Irregularidades moderadas	0.010	
	Irregularidades severas	0.020	
Cambios de secciones transversales	Gradual	0.000	0
	Ocasional	0.005	
	Muchos cambios	0.010 - 0.015	
Obstrucciones o grandes bloques en el cauce	Ninguno	0.000	0
	Menores	0.010 - 0.015	
	Apreciables	0.020 - 0.030	
	Severos	0.040 - 0.060	
Vegetación en el cauce	Baja	0.005 - 0.010	0.007
	Media	0.010 - 0.020	
	Alta	0.025 - 0.050	
	Muy Alta	0.050 - 0.100	
Cantidad de meandros	Menor	1.000	1
	Apreciable	1.150	
	Severa	1.300	

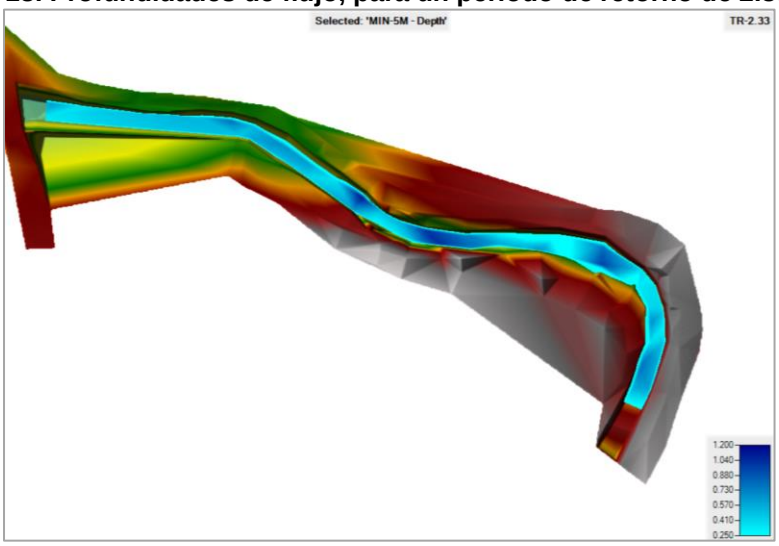
Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

En el ANEXO 3.1.3 MODELO HIDRÁULICO se puede ver con mayor detalle la estimación del coeficiente de Maning.

2.4.1.3 Resultados

Una vez ingresada la información topo-batimétrica y los caudales máximos determinados en la sección 6 al modelo hidráulico, así como el respectivo coeficiente de rugosidad de Manning, se ejecuta una simulación de flujo permanente. A continuación, se presenta el resumen de los resultados obtenidos más relevantes; los resultados detallados de los modelos hidráulicos para los diferentes caudales se presentan en el ANEXO 3.1.3 MODELO HIDRÁULICO. En la Figura 18 se presentan las profundidades de flujo para un caudal asociado a un periodo de retorno de 2.33 años. Se puede observar que para este escenario el cauce del río Molinero contiene los flujos sin presentarse desborde, alcanzando de esta forma profundidades entre los 0.24m y 1.10m.

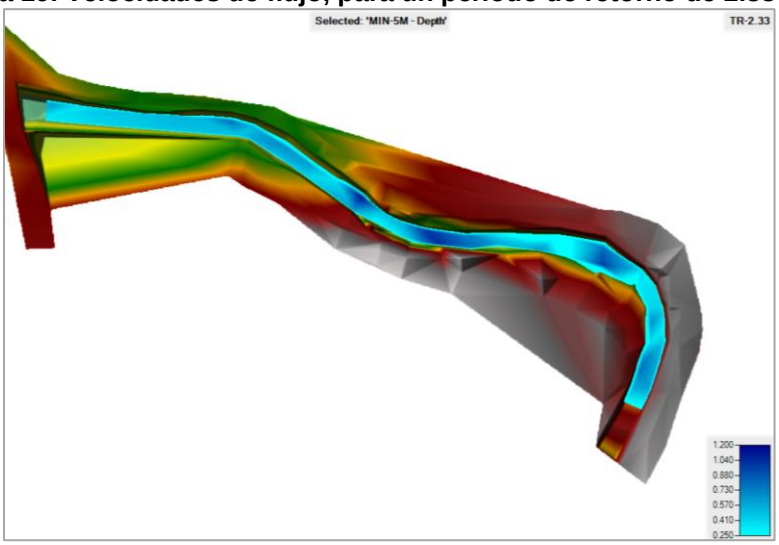
Figura 18. Profundidades de flujo, para un periodo de retorno de 2.33 años



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024, con base en HEC-RAS

Por su parte en la Figura 19 se muestra la distribución de velocidades del flujo que se presentan en el cauce para un TR 2.33 a lo largo del tramo analizado, encontrando que las velocidades mayores se presentan hacia el centro del cauce, alcanzando valores máximos de 2,50m/s.

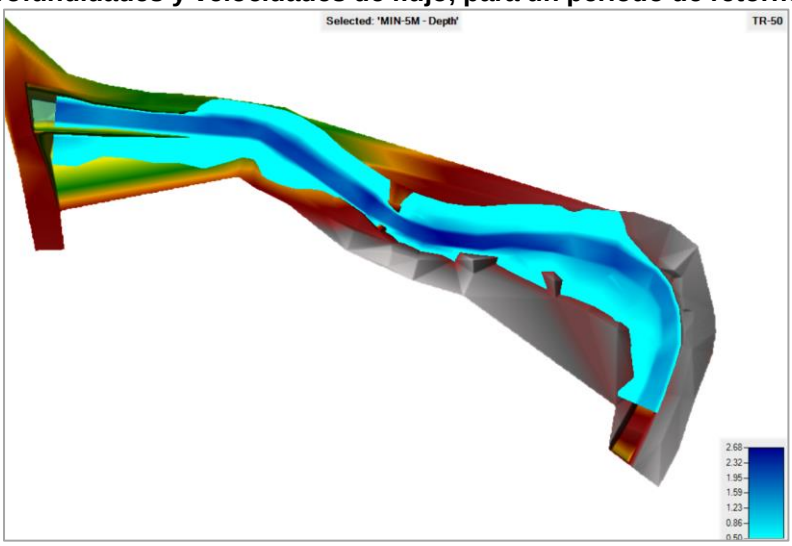
Figura 19. Velocidades de flujo, para un periodo de retorno de 2.33 años



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024, con base en HEC-RAS

En la Figura 20 se presentan las profundidades de flujo para un caudal asociado a un periodo de retorno de 50 años. Se puede observar que para este escenario el cauce del río Molinero no es capaz de soportar los flujos y ocurre desborde en casi toda la longitud, alcanzando de esta forma profundidades entre los 0,5m en las bancas y de 2,68m en el canal principal.

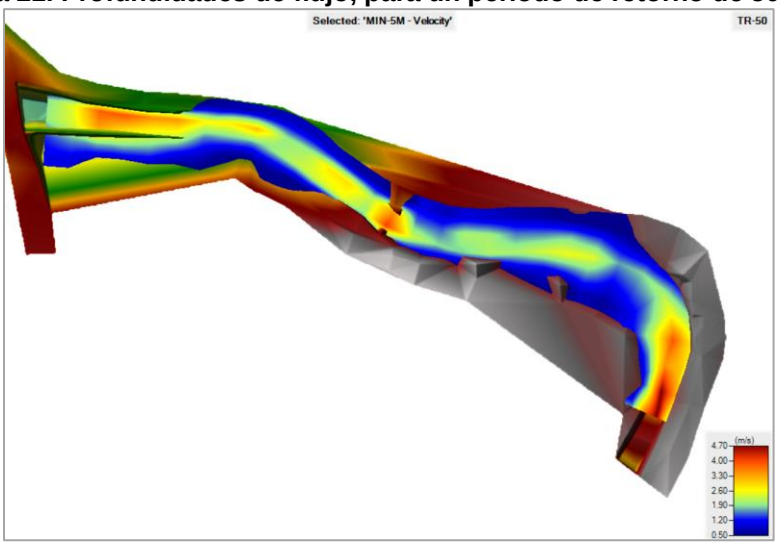
Figura 20. Profundidades y velocidades de flujo, para un periodo de retorno de 50 años



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024, con base en HEC-RAS

Por su parte en la Figura 21 se muestra la distribución de velocidades del flujo que se presentan en el cauce para un TR 50 a lo largo del tramo analizado, encontrando que las velocidades mayores se presentan hacia el centro del cauce, alcanzando valores máximos de 4,70m/s.

Figura 21. Profundidades de flujo, para un periodo de retorno de 50 años



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024, con base en HEC-RAS

2.5 ESTUDIO DE SOCAVACIÓN (Ver ANEXO 3.1.4 SOCAVACIÓN GENERAL)

Los estudios de socavación consisten principalmente en el análisis y la determinación de profundidades críticas de tipo erosivo producto de la velocidad de corriente en la cercanía a las estructuras mayores.

Para la determinación de la socavación total se estudia la socavación general y la socavación local. En la socavación general se considera el cambio en el lecho producto del aumento en la capacidad de arrastre en las zonas de contracción y en la socavación local se considera el efecto de arrastre en los estribos y las pilas, cuando los elementos estructurales obstaculizan el paso libre del agua a través del cauce, en el caso de estudio, esta última se desprecia pues en el tramo no se proyecta la construcción de este tipo de obras en el cauce.

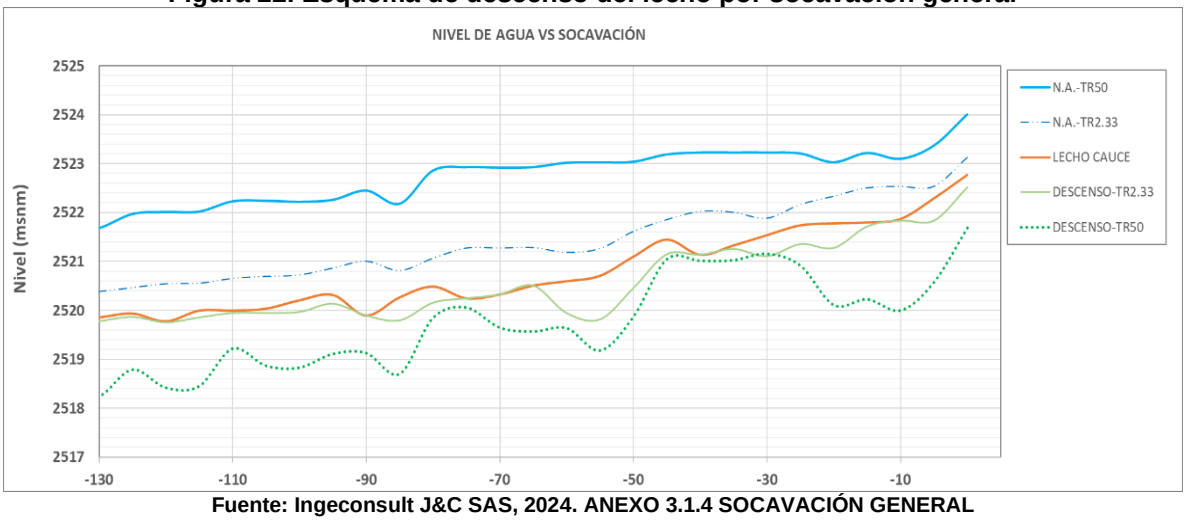
2.5.1 Resultados

Con los datos obtenidos de la simulación hidráulica, se ejecuta el cálculo de la socavación general sobre el lecho del río para la elevación más baja de cada sección. A continuación, se especifican los valores definidos para cada parámetro del cálculo.

- Se realizo el análisis de socavación general tomando el valor dm como 27,29 mm.
- Debido a que el cauce de estudio tiene características de un río de alta montaña, el cual genera grandes tasas de trasporte de sedimentos, el peso específico del agua se toma igual a 1.1 Ton/m3, con lo que el coeficiente de corrección ø resulta en 1.13.
- El coeficiente de contracción μ se toma igual a 1 a lo largo del cauce.
- Los demás valores del método se obtienen de los resultados de la modelación hidráulica.

Con base en estos valores, se obtienen los niveles de socavación a lo largo del lecho del tramo del río Molinero, presentando los resultados para los periodos de retorno de 2.33 y 50 años en la Figura 22. De los resultados se resalta que para un periodo de retorno de 2,33 años el descenso del lecho no es apreciable, salvo en algunas secciones en dónde se alcanzan valores cercanos a 1,0m; por su parte, para un periodo de retorno de 50 años, el descenso del lecho es importante al largo del tramo alcanzando valores de hasta 1,90m.

Figura 22. Esquema de descenso del lecho por socavación general



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 3.1.4 SOCAVACIÓN GENERAL

Los resultados indican que para el caudal de diseño (TR50), se van a presentar descensos del lecho a lo largo del tramo objeto de análisis, en consecuencia, se hace necesario que dentro de las obras de ingeniera proyectadas se considere esta profundidad como el nivel al que se lleven las obras de protección o encauzamiento.

2.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN U OBRA DE PROTECCIÓN Y/O MITIGACIÓN (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO)

Los límites de la zona de estudio son los siguientes: por el costado norte vía de acceso sin pavimentar y lotes baldíos, por el costado sur cauce del río Molinero y edificaciones de uno (1) y dos (2) niveles; por el costado oriental cauce del río Molinero y lotes baldíos; y por el costado occidental vía pavimentada. Las características de los límites en el 100% de la zona del proyecto, corresponden a vía de acceso sin pavimentar, vía pavimentada, cauce del río Molinero, lotes baldíos, y edificaciones de uno (1) y dos (2) niveles, situación que implica un manejo técnico cuidadoso durante la etapa de cortes y/o excavaciones para la construcción de la estructura de mitigación y/o protección proyectada.

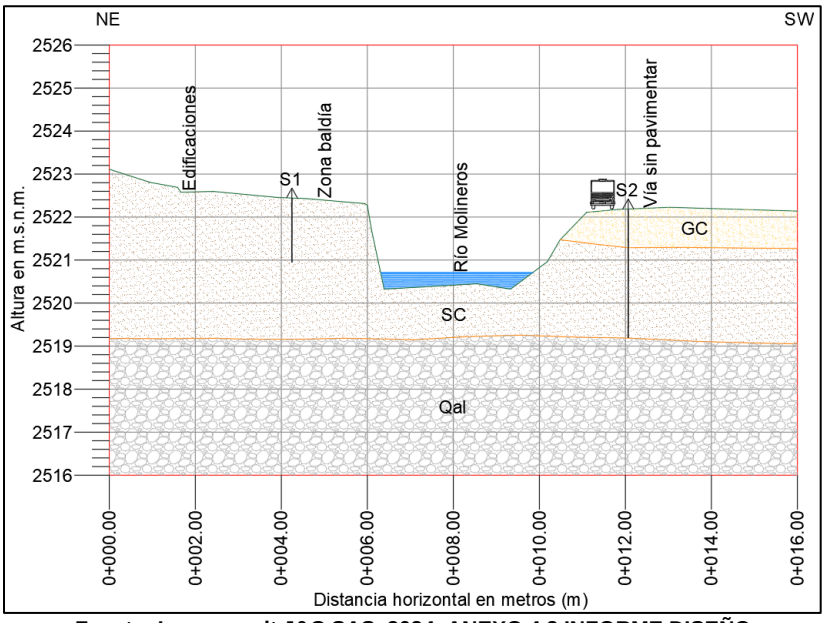
Los suelos circundantes a la zona del proyecto son mal drenados superficialmente, debido a que la escorrentía superficial es alta hacia la zona del proyecto, y la topografía es inclinada en el cuerpo de las márgenes y/o taludes del río, y relativamente plana en la parte alta; por lo tanto, existen problemas de acumulación e infiltración de aguas superficiales en la parte superior, y cuerpo de las márgenes y/o taludes del río Molinero, por la falta de sistemas de drenaje de aguas superficiales en la vía de acceso sin pavimentar.

La zona de estudio, presenta problemas geotécnicos externos e inherentes por naturaleza como son: pendiente topográfica inclinada de los taludes, falta de confinamiento de las márgenes y/o taludes del río Molinero en la zona de estudio, los materiales no consolidados constitutivos del terreno, la socavación del río Molinero en las márgenes y/o taludes en la zona de estudio, las infiltraciones de aguas superficiales en la parte superior y cuerpo del talud, por la falta de sistemas de drenaje de aguas superficiales, que contribuyen a la inestabilidad de la zona de estudio, siendo estos los principales inconvenientes geotécnicos desfavorables que se requieren sortear para la estabilización de la zona de estudio.

2.6.1 Análisis de estabilidad en condiciones actuales (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO)

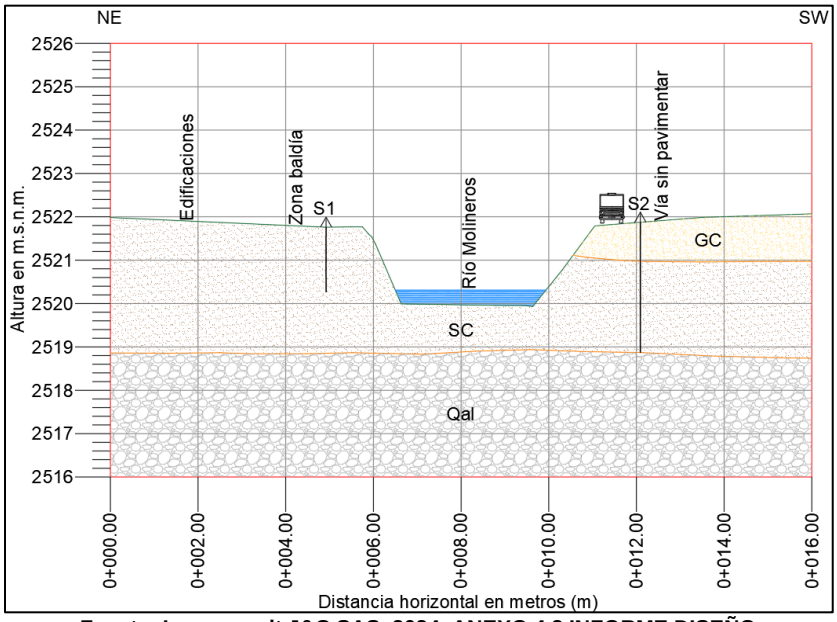
Para realizar los análisis de estabilidad en condiciones actuales de la zona de estudio, se trabajó sobre los cortes Geológico - Geotécnicos A - A´ y B´ - B´, los cuales fueron elaborados de acuerdo a las propiedades geomecánicas del perfil del subsuelo explorado, y a la topografía levantada de la zona de estudio. (Ver Figura 23 y Figura 24)

Figura 23. Corte Geológico - Geotécnico A - A´ (Km0+100), del terreno en condiciones actuales.



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

Figura 24. Corte Geológico - Geotécnico B - B´ (Km0+130), del terreno en condiciones actuales.



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

Con base en los resultados de la caracterización geomecánica del subsuelo explorado dentro de la zona de estudio, en la Tabla 15, se puede observar los parámetros geomecánicos promedio de estos materiales, con los que se van a realizar los análisis de estabilidad y/o modelamientos en condiciones actuales.

Tabla 15. Propiedades geomecánicas del perfil de suelo explorado

CAPA Y/O ESTRATO	PESO UNITARIO TOTAL (t/m^3)	ANGULO DE FRICCIÓN ϕ (°)	COHESIÓN C (t/m^2)	MODELO
Relleno recomendado	2,1	28,0	3,0	Mohr Coulomb
GC (relleno vía)	2,05	27,0	2,0	
SC (Suelo natural)	1,8	20,2	2,5	
Qal (Dep. Aluvial)	1,91	26,0	1,0	

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

De acuerdo con los resultados de los factores de seguridad calculados (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO), en los análisis de estabilidad realizados a las dos (2) secciones definidas en condiciones actuales, se concluye que los taludes analizados, se encuentran parcialmente estables, debido a que no se están presentando movimientos grandes o fallas de fondo, si no por el contrario, se está presentando una falla relativamente superficial (Ver Tabla 16).

Sin embargo, así los factores de seguridad presentan valores moderados, esto no significa que los taludes vayan a seguir siendo parcialmente estables a través del tiempo, en las mismas condiciones en las que se encuentran actualmente, por lo cual, la estabilidad de la zona de estudio está sujeta a que se diseñe y construya una estructura de mitigación y/o protección contra la socavación del río Molineros en este sector, a la empradización y reforestación de los taludes existentes que carezcan de capa vegetal, y los generados durante la reconformación del terreno, y a la construcción de sistemas de drenaje de aguas superficiales, en la vía sin pavimentar que se encuentra en la parte alta de la zona de estudio, que capten, conduzcan y descarguen técnicamente las aguas lluvias y de escorrentía, al sistema de alcantarillado del sector o directamente al cauce del río Molineros, sin que estas aguas lleguen a provocar problemas de inestabilidad.

Tabla 16. Valores de los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, de las dos (2) secciones analizadas, en condiciones actuales

CONDICIONES ACTUALES					
SECCIÓN ANALIZADA	TALUD ANALIZADO	MARGEN DERECHA		MARGEN IZQUIERDA	
		F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA
A - A´ km0+100	Talud general, en condición actual	2,485	2,087	2,082	1,738
	Talud general, con aumento del nivel freático	2,484	2,079	2,057	1,717
B - B´ km0+130	Talud general, en condición actual	2,379	1,973	2,693	2,211
	Talud general, con aumento del nivel freático	2,375	1,969	2,669	2,142

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

2.6.2 Determinación de obra de contención/mitigación (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO)

De acuerdo con los resultados del estudio geotécnico realizado, donde se determinó que el subsuelo explorado dentro de la zona de estudio es netamente granular, los resultados del estudio de hidráulica y socavación, donde se determinó el nivel máximo de socavación hacia el lecho y los costados del río Molineros, los resultados de los análisis de estabilidad realizados, donde se determinó que no se están presentando movimientos grandes de tierra o fallas de fondo, si no por el contrario, se está presentando una falla relativamente superficial, con los resultados de la evaluación de amenaza en condiciones actuales, lo cual determino un grado de amenaza a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, en condiciones actuales baja, y teniendo en cuenta que el elemento vulnerable en esta zona es la vía de acceso sin pavimentar; por lo anterior, desde el punto de vista técnico, económico, de vulnerabilidad de elementos expuestos, y para controlar los procesos de socavación en los taludes de la zona de estudio, se recomienda el diseño y construcción de un sistema de tablestacado en las márgenes y/o taludes del río Molinero, entre el Km0+089 al Km0+142 (53 m) en la margen derecha, y entre el Km0+095 al Km0+123 (28 m) en la margen izquierda, aguas abajo, y el diseño de obras de drenaje en la vía sin pavimentar.

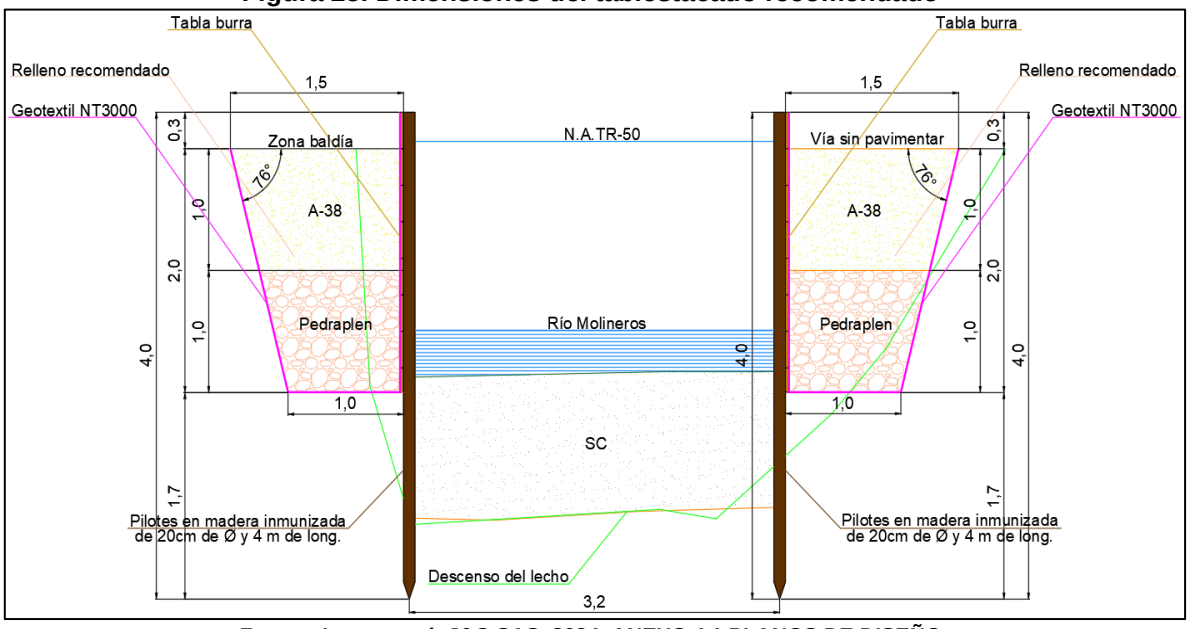
2.6.2.1 Geometría del tablestacado

De acuerdo con las condiciones topográficas de la zona de estudio, las características de los materiales existentes, los resultados de los análisis de estabilidad del talud en condiciones actuales, y para controlar la socavación en los taludes de la zona de estudio, se recomienda construir un tablestacado en la margen derecha del río Molineros, aguas abajo, en una longitud de 53 m, entre las abscisas km0+089 al Km0+142, y otro tablestacado en la margen izquierda del río Molineros, aguas abajo, en una longitud de 28 m, entre las abscisas km0+095 al Km0+123, que garantice la estabilidad de los taludes de estos tramos con bajas deformaciones, ver ANEXO 4.1 PLANOS DE DISEÑO.

2.6.2.2 Materiales de construcción

El tablestacado proyectado consta de palos y/o pilotes en madera inmunizada de 4 m de longitud y 20 cm de diámetro, empotrados en el suelo natural (Capa B (SC) y Capa C (Qal)), los cuales deben estar unidos entre si mediante vigas o secciones de conexión con tablas burra en madera inmunizada; la madera tanto de los pilotes, como la de las tablas burra, debe ser inmunizada y/o impregnada con ACPM, o con productos Sika (Merulex), para de esta manera darle una mayor durabilidad. Por otra parte, en la parte posterior de los pilotes y las vigas de conexión, se debe colocar un filtro de geotextil no tejido (NT 3000), para que de esta manera solo dejar pasar el agua infiltrada, y permita la retención de sedimentos y colmatación de la estructura, y no se produzca erosión hídrica en el suelo, para evitar deformaciones en la vía y en las zonas baldías, y así darle una mayor estabilidad y vida útil al tablestacado proyectado en ambas márgenes del río Molineros, ver Figura 25 y ANEXO 4.1 PLANOS DE DISEÑO.

Figura 25. Dimensiones del tablestacado recomendado



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.1 PLANOS DE DISEÑO

Los detalles del tablestacado junto con los respectivos cálculos de diseño, se detallan en el ANEXO 4.1 PLANOS DE DISEÑO.

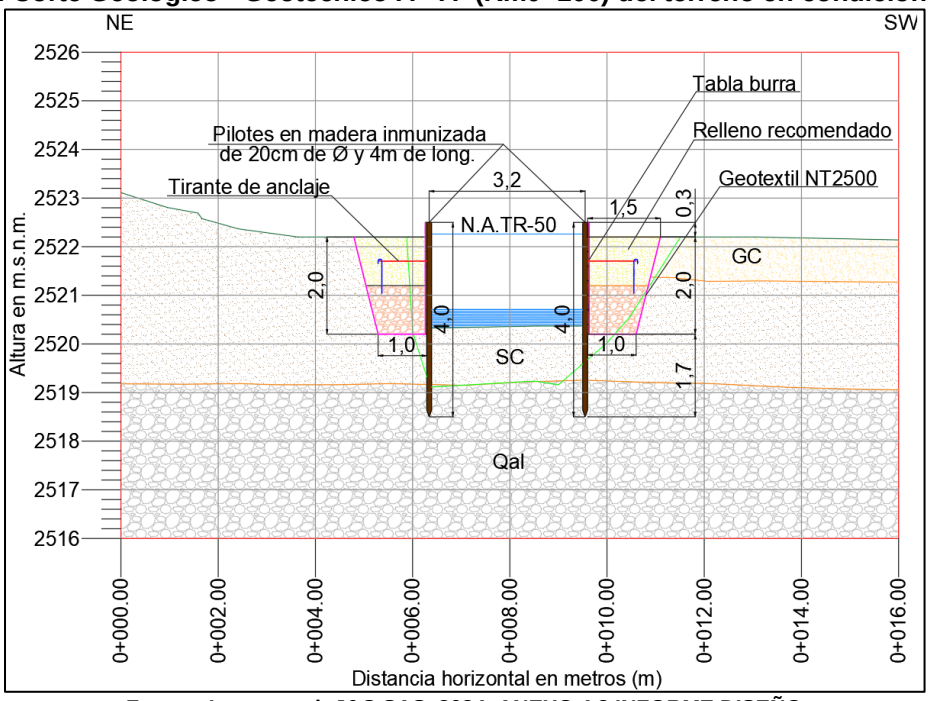
2.6.3 Análisis de estabilidad en condiciones finales (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO)

Los análisis de estabilidad de la zona de estudio en condiciones finales, es decir con el tablestacado implantado en el terreno, se realiza con base en dos (2) cortes Geológico - Geotécnicos elaborados de acuerdo a la topografía de la zona de estudio, los parámetros geomecánicos del perfil del subsuelo explorado obtenidos del estudio geotécnico realizado, los parámetros sísmicos de la zona donde se encuentra el proyecto, y el diseño del tablestacado proyectado; con lo anterior se realizaron análisis estáticos y pseudoestáticos de las condiciones finales del terreno, permitiendo conocer los factores de seguridad en condiciones finales para las secciones mencionadas, calculados por el método de Bishop, mediante la aplicación del software Slide V.6.0 de Rocscience, utilizando el modelo de Mohr Coulomb para las capas de suelo y relleno, basado en lo descrito en el libro Estabilidad de Taludes de Gerscovich (2012), y el libro Deslizamientos, Análisis Geotécnico de Suárez (2009); para los análisis de estabilidad se simularon las situaciones más críticas, teniendo en cuenta las sobrecargas originadas por los vehículos y maquinaria necesaria para la construcción del tablestacado, las posibles infiltraciones de aguas superficiales debido a la morfología del terreno, y la aceleración sísmica de la zona del proyecto en el caso de los análisis pseudoestáticos.

Para realizar los análisis de estabilidad en condiciones finales de la zona de estudio, se trabajó sobre los cortes Geológico - Geotécnicos A - A´ y B´ - B´, los cuales fueron

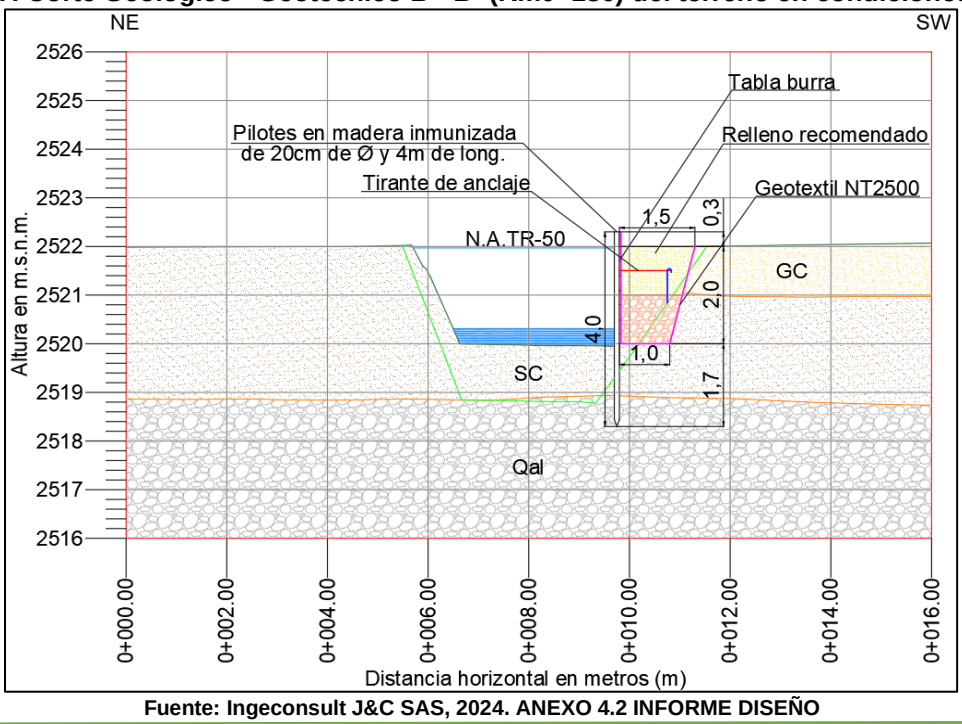
elaborados de acuerdo a las propiedades geomecánicas del perfil de suelo explorado, a la topografía levantada de la zona de estudio, y al diseño del tablestacado proyectado. (Ver Figura 26 y Figura 27)

Figura 26. Corte Geológico - Geotécnico A - A´ (Km0+100) del terreno en condiciones finales



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

Figura 27. Corte Geológico - Geotécnico B - B´ (Km0+130) del terreno en condiciones finales.



Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

En la Tabla 17, se puede observar los resultados de los factores de seguridad calculados a las dos (2) secciones definidas, en condiciones finales.

Tabla 17. Valores de los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, de las dos (2) secciones analizadas, en condiciones actuales

CONDICIONES FINALES					
SECCIÓN ANALIZADA	TALUD ANALIZADO	MARGEN DERECHA		MARGEN IZQUIERDA	
		F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA
A - A´ km0+100	Talud general, en condición actual	4,668	2,908	3,298	2,387
	Talud general, con aumento del nivel freático	4,074	2,537	2,871	1,988
B - B´ km0+130	Talud general, en condición actual	3,809	2,532	2,688	2,251
	Talud general, con aumento del nivel freático	3,319	2,205	2,577	2,119

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

2.6.4 Contraste entre los análisis de estabilidad en condiciones actuales y finales

Los valores de los factores de seguridad obtenidos en los análisis de estabilidad realizados en condiciones actuales, son moderados, en comparación con los calculados en los análisis de estabilidad en condiciones finales, los cuales son valores moderados a medios, con factores de seguridad más altos, en la Tabla 18, se pueden ver los valores de los factores de seguridad calculados en los dos (2) casos.

Tabla 18. Valores de los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, calculados en condiciones actuales y finales.

SECCIÓN ANALIZADA	TALUD ANALIZADO	CONDICIONES ACTUALES				CONDICIONES FINALES			
		MARGEN DERECHA		MARGEN IZQUIERDA		MARGEN DERECHA		MARGEN IZQUIERDA	
		F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA
A - A´ km0+100	Talud general, en condición actual	2,485	2,087	2,082	1,738	4,668	2,908	3,298	2,387
	Talud general, con aumento del nivel freático	2,484	2,079	2,057	1,717	4,074	2,537	2,871	1,988
B - B´ km0+130	Talud general, en condición actual	2,379	1,973	2,693	2,211	3,809	2,532	2,688	2,251
	Talud general, con aumento del nivel freático	2,375	1,969	2,669	2,142	3,319	2,205	2,577	2,119

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior, se puede observar que los taludes de la zona de estudio en condiciones actuales presenta valores de factores de seguridad moderados, y que al construir el tablestacado proyectado, los valores de los factores de seguridad aumentan, por lo que se comprueba la viabilidad del diseño del tablestacado proyectado; sin embargo, la estabilidad de los taludes de la zona de estudio, no depende solamente de la construcción del tablestacado proyectado, sino también de una completa empradización de los taludes perimetrales que carezcan de capa vegetal, y de los generados durante la construcción del tablestacado, y de la construcción de zanjas

y/o cunetas en ambos costados de la vía sin pavimentar en la margen derecha, y la construcción de zanjas y/o cunetas en la parte superior del talud de la margen izquierda, las cuales deben ser totalmente impermeabilizadas con concreto, piedra pegada y/o geomembrana de polietileno, con el fin de no permitir que estas sirvan como elementos de filtración de agua al cuerpo de los taludes, y al tablestacado proyectado, de tal forma que capten, conduzcan y descarguen técnicamente las aguas superficiales al sistema de alcantarillado del sector o directamente al cauce del río Molineros.

2.6.5 Evaluación de amenaza de los taludes analizados (Ver ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO)

Los valores de los factores de seguridad calculados en los análisis de estabilidad realizados, tanto en condiciones actuales como en condiciones finales, fueron correlacionados con el grado de amenaza según los lineamientos establecidos en la Resolución 227 de 2006 del DPAE (DPAE, 2006), ver Tabla 19.

Tabla 19. Valoración de amenaza de los factores de seguridad calculados

AMENAZA	CONDICIONES NORMALES F.S.
Baja	>1,9
Media	1,2-1,9
Alta	<1,2
AMENAZA	**CONDICIONES NORMALES F.S.**
Baja	>1,3
Media	1,0-1,3
Alta	<1,0

Fuente: Resolución 227 de 2006 del DPAE

2.6.5.1 Evaluación de amenaza del talud en estudio en condiciones actuales

La Tabla 20, presenta la correlación entre los factores de seguridad calculados y el grado de amenaza a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas, de los taludes en estudio analizados en condiciones actuales.

Tabla 20. Grado de amenaza de los taludes en estudio analizado en condiciones actuales.

SECCIÓN ANALIZADA	TALUD ANALIZADO	MARGEN DERECHA				MARGEN IZQUIERDA			
		F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS
A - A´ km0+100	Talud general, en condición actual	2,485	Baja	2,087	Baja	2,485	Baja	2,087	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	2,484	Baja	2,079	Baja	2,484	Baja	2,079	Baja
B - B´ km0+130	Talud general, en condición actual	2,379	Baja	1,973	Baja	2,379	Baja	1,973	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	2,375	Baja	1,969	Baja	2,375	Baja	1,969	Baja

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior, se concluye que el grado de amenaza a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, en condiciones actuales es baja, debido a que no se están presentando movimientos grandes o fallas de fondo, si no por el contrario, se está presentando una falla relativamente superficial; sin embargo, así los factores de seguridad presenten valores moderados, esto no significa que los taludes vayan a seguir siendo parcialmente estables a través del tiempo, en las mismas condiciones en las que se encuentran actualmente.

2.6.5.2 Evaluación de amenaza del talud en estudio en condiciones finales

La Tabla 21, presenta la correlación entre los factores de seguridad y el grado de amenaza a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, tanto en condiciones estáticas como en condiciones pseudoestáticas, de los taludes analizados en condiciones finales.

Tabla 21. Grado de amenaza de los taludes en estudio analizado en condiciones finales.

SECCIÓN ANALIZADA	TALUD ANALIZADO	MARGEN DERECHA				MARGEN IZQUIERDA			
		F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS
A - A´ km0+100	Talud general, en condición actual	4,668	Baja	2,908	Baja	3,298	Baja	2,387	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	4,074	Baja	2,537	Baja	2,871	Baja	1,988	Baja
B - B´ km0+130	Talud general, en condición actual	3,809	Baja	2,532	Baja	2,688	Baja	2,251	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	3,319	Baja	2,205	Baja	2,577	Baja	2,119	Baja

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior, se concluye que el grado de amenaza a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, en condiciones finales, es decir con el tablestacado implantado en el terreno, es baja; por lo que, se comprueba la viabilidad del diseño del tablestacado proyectado.

2.6.5.3 Factores de seguridad básicos mínimos directos

Por otra parte, también se correlacionaron los valores de los factores de seguridad de los análisis de estabilidad realizados en condiciones finales, tanto estáticos como pseudoestáticos, de acuerdo a lo estipulado en la Tabla H.2.4-1 (Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos) de la NSR-10, lo cual se puede ver en la Tabla 22, y en la Tabla 23.

De acuerdo con los resultados mostrados en las tablas, se puede observar que los factores de seguridad calculados a los taludes de la zona de estudio en condiciones finales, es decir con el tablestacado implantado en el terreno, son mayores a los estipulados en la Tabla H.2.4-1 (Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos) de la NSR-10, en etapa de diseño; por lo tanto, se comprueba la viabilidad del diseño del tablestacado proyectado.

Tabla 22. Comprobación de los factores de seguridad básicos mínimos directos, margen derecha.

SECCIÓN ANALIZADA	TALUD ANALIZADO	MARGEN DERECHA				MARGEN IZQUIERDA			
		F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS
A - A´ km0+100	Talud general, en condición actual	4,668	Baja	2,908	Baja	3,298	Baja	2,387	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	4,074	Baja	2,537	Baja	2,871	Baja	1,988	Baja
B - B´ km0+130	Talud general, en condición actual	3,809	Baja	2,532	Baja	2,688	Baja	2,251	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	3,319	Baja	2,205	Baja	2,577	Baja	2,119	Baja

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

Tabla 23. Comprobación de los factores de seguridad básicos mínimos directos, margen izquierda.

SECCIÓN ANALIZADA	TALUD ANALIZADO	MARGEN DERECHA				MARGEN IZQUIERDA			
		F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS	F.S. EN CONDICIÓN ESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES NORMALES	F.S. EN CONDICIÓN PSEUDOESTÁTICA	GRADO DE AMENAZA, CONDICIONES EXTREMAS
A - A´ km0+100	Talud general, en condición actual	4,668	Baja	2,908	Baja	3,298	Baja	2,387	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	4,074	Baja	2,537	Baja	2,871	Baja	1,988	Baja
B - B´ km0+130	Talud general, en condición actual	3,809	Baja	2,532	Baja	2,688	Baja	2,251	Baja
	Talud general, con aumento del nivel freático	3,319	Baja	2,205	Baja	2,577	Baja	2,119	Baja

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024. ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO

2.6.6 Proceso constructivo y especificaciones técnicas para la construcción del tablestacado proyectado

En primer lugar, antes de la construcción del tablestacado proyectado, se deben perfilar los taludes, retirando solamente el material ya suelto, para de esta manera disminuir el peso y/o empujes de tierra, y así realizar los cortes y/o excavaciones para la construcción del tablestacado; luego de construido el tablestacado, se procederá a la construcción de zanjas y/o cunetas en ambos costados y/o márgenes del río Molinero, y por último se procederá a empradizar los taludes generados por la construcción del tablestacado, y los perimetrales a la zona de estudio que carezcan de capa vegetal, con bloques de césped.

2.6.6.1 Proceso constructivo del tablestacado

Para el proceso constructivo del tablestacado se recomienda realizar las siguientes actividades (Descritas con mayor detalle en el ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO)

- Identificar camino de Acceso Para la Construcción del Tablestacado; Para poder comenzar con la construcción del tablestacado proyectado en la margen derecha del río, se puede acceder por la vía de acceso sin pavimentar existente en la parte superior de este talud; y para la construcción del tablestacado proyectado en la margen izquierda del río, se puede acceder por el puente en madera existente, que comunica la vía sin pavimentar con las edificaciones existentes en la parte superior de este talud.
- Replanteo y Control Topográfico en Obra

- Preparación del Terreno Para la Construcción del Tablestacado; Primero que todo se debe retirar parte del material suelto que se encuentra en los taludes de la zona de estudio, luego realizar una excavación de 2 m de altura, 1 m de base, y 1,5 m en la parte superior, dejando un ángulo de corte de 76°, es decir que se debe excavar desde la cota 2522,2 m.s.n.m., la cual es la cota de la rasante de la vía sin pavimentar en la margen derecha del río, y de la rasante de las zonas baldías en la margen izquierda del río, hasta la cota 2520,2 m.s.n.m; para de esta manera hincar y/o instalar los pilotes en madera, en las dos (2) márgenes del río
- Construcción del Tablestacado; La estructura de mitigación y/o protección recomendada, consta de la construcción de un tablestacado en la margen derecha del río Molinero, aguas abajo, en una longitud de 53 m, entre las abscisas km0+089 al Km0+142, y otro tablestacado en la margen izquierda del río Molinero, aguas abajo, en una longitud de 28 m, entre las abscisas km0+095 al Km0+123.
- Material de Relleno a Instalar en el Espaldar del Tablestacado; El material de relleno recomendado a instalar en el espaldar del tablestacado en las dos (2) márgenes del río Molinero, se compone de 1 m de pedraplén, y de 1 m de afirmado (A-38);
- Por otra parte, a medida que se va construyendo el tablestacado, y se va instalando el relleno recomendado al espaldar del mismo, se debe instalar tirantes de anclaje espaciados cada 2 m; los cuales, amarraran el palo y/o pilote en madera con una varilla de anclaje instalada a 1 m de distancia del palo y/o pilote en su lado opuesto
- Sujetacables y/o grapas de cables serán empleados para amarrar los dobleces de mínimo 30 cm, que se recomienda hacer para los tirantes y/o cables de anclaje, los cuales quedarán distanciados cada 10 cm.

2.6.6.2 Materiales para la construcción del tablestacado

Los materiales para la construcción de tablestacado se enlistan a continuación; los detalles y descripciones de dichos materiales se pueden consultar en el ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO.

- Estacas de Madera
- Tablas Burra y/o Vigas de Conexión
- Geotextil NT3000
- Tirantes y Varillas de Anclaje
- Sujetacables y/o grapas de cables

2.6.6.3 Obras adicionales

Para mejorar la estabilidad del terreno en la zona de estudio se proponen las siguientes obras adicionales, cuya descripción pueden consultarse en el ANEXO 4.2 INFORME DISEÑO.

- Sistemas de Drenaje
- Sellado de Grietas
- Empradización

2.7 PLAN DE MANEJO AMBIENTAL (PMA)

El Plan de Manejo Ambiental (PMA) es un instrumento de gestión que establece de manera detallada las estrategias, medidas y acciones necesarias para prevenir, mitigar, controlar y, cuando sea necesario, compensar los impactos ambientales negativos derivados de un proyecto, actividad o proceso. Su finalidad es garantizar la protección del medio ambiente, la salud humana y la integridad de los recursos naturales, promoviendo un desarrollo sostenible y equilibrado en el área de influencia del proyecto.

El PMA se fundamenta en la identificación, calificación y evaluación técnica de los impactos ambientales asociados a las actividades propuestas. En el caso específico del trámite de solicitud del permiso para la ocupación del cauce del río Molinero, este documento constituye una herramienta clave para asegurar que el desarrollo de las actividades sea compatible con las condiciones ambientales del entorno. Las medidas contenidas en el PMA están diseñadas para minimizar las afectaciones al ecosistema acuático, conservar la biodiversidad y garantizar el uso sostenible del recurso hídrico.

El principal objetivo del PMA es definir un conjunto integral de acciones que se implementarán durante las diferentes etapas del proyecto. Estas acciones están dirigidas a proteger y preservar el entorno físico, biótico y social de la zona de influencia, mediante la aplicación de medidas preventivas, correctivas y compensatorias. Los programas claves se muestran en la Tabla 24 y su descripción detallada se plasman en el ANEXO 5. PLAN DE MANEJO AMBIENTAL.

Tabla 24. Programas del PMA

MEDIO	PROGRAMA
ABIÓTICO	✓ Manejo de estructuras, materiales de obra y residuos ✓ Cobertura vegetal ✓ Manejo de Residuos Sólidos ✓ Manejo adecuado en la intervención del cauce ✓ Extracción o movimientos de materiales del cauce ✓ Control de emisiones atmosféricas ✓ Control de ruido
BIÓTICO	✓ Manejo y conservación de especies vegetales ✓ Manejo fauna ✓ Manejo comunidades acuáticas ✓ Manejo control de plagas
SOCIOECONÓMICO	✓ Información de participación comunitaria ✓ Capacitación al personal vinculado

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

2.8 PRESUPUESTO

El presupuesto correspondiente al diseño de las obras de contención y/o reconformaciones proyectadas para la zona de estudio se encuentra en el ANEXO 13.4.3

3 CONCLUSIONES

- El objetivo principal de este estudio es realizar un análisis de estabilidad geotécnica de la zona de interés, considerando tanto las condiciones actuales como las proyectadas tras la intervención. Adicionalmente, se busca diseñar una estructura de mitigación y/o protección destinada a estabilizar las márgenes y taludes del río Molinero en el tramo comprendido entre el Km 0+089 y el Km 0+142. Esta área se localiza en el sector suroriental, zona rural del barrio Monquirá, específicamente en el sector La Playita, municipio de Sogamoso, departamento de Boyacá. El propósito final es garantizar una mayor estabilidad y prolongar la vida útil tanto del área intervenida como de la estructura diseñada, asegurando su funcionalidad y sostenibilidad a largo plazo.
- Se realiza el levantamiento topográfico del cauce del río Minero, a partir del cual se obtienen curvas de nivel primarias y secundarias, donde su espaciamiento se da cada 10 metro para las primarias y cada 1 metros para las secundarias; la digitalización en planta de las características del terreno: forma, longitud total, relieve topográfico, intersección de vías, localización de viviendas; se genera un perfil longitudinal que muestran a detalle el contorno de la zona con distanciamiento desde el eje del cauce de 10 metros aproximadamente, y se establece un abcisado del perfil longitudinal cada 10 metros, debido a que la naturaleza del levantamiento es de forma lineal y distante.
- Las características de los límites en el 100% de la zona del proyecto, corresponden a vía de acceso sin pavimentar, cauce del río Molinero, lotes baldíos, y edificaciones de uno (1) y dos (2) niveles, situación que implica un manejo técnico cuidadoso durante la etapa de cortes y/o excavaciones para la construcción de la estructura de mitigación y/o protección proyectada.
- A partir del estudio de suelos se puede establecer de forma general que en el sitio investigado el suelo de fundación se conforma por una secuencia interestratificada de un material Areno-arcilloso con presencia de gravas, que presentan variación en sus espesores y profundidad en cada una de las perforaciones así:
  - Sondeo 1. Desde la Superficie y hasta una profundidad de 1.50 m se establece la presencia de un material areno-arcilloso de color café oscuro, en el que se observan cantos redondeados a subredondeados de tamaños heterométricos clasificado como SC.
  - Sondeo 2. Desde la Superficie y hasta una profundidad 0.90 m se establece de un relleno compuesto un recebo granular de color amarillo clasificado como GC, desde esta profundidad y hasta la máxima profundidad de exploración 2.80 m se establece la presencia de un material areno-arcilloso de color café oscuro, en el que se observan cantos redondeados a subredondeados de tamaños heterométricos. clasificado como SC.
- Con base en los resultados de la caracterización geomecánica del subsuelo explorado dentro de la zona de estudio, en la Tabla 15, se puede observar los parámetros geomecánicos promedio de estos materiales, que se tomaron en cuenta para los análisis de estabilidad y/o modelamientos en condiciones actuales y finales.

Tabla 25. Propiedades geomecánicas del perfil de suelo explorado

CAPA Y/O ESTRATO	PESO UNITARIO TOTAL (t/m^3)	ANGULO DE FRICCIÓN ϕ (°)	COHESIÓN C (t/m^2)	MODELO
Relleno recomendado	2,1	28,0	3,0	Mohr Coulomb
GC (relleno vía)	2,05	27,0	2,0	
SC (Suelo natural)	1,8	20,2	2,5	
Qal (Dep. Aluvial)	1,91	26,0	1,0	

Fuente: Ingeconsult J&C SAS, 2024.

- Durante la exploración del subsuelo, no se determinó la presencia de un nivel freático; sin embargo, la proximidad al afluente del río Molinero genera altos niveles de humedad en el terreno.
- La cuenca del río Molinero a la altura de la carrera 4A alcanza los 24,33 km2 con una longitud de cauce de 10,65Km. Como la cuenca no cuenta con estación medidoras de caudal, de un tamaño considerable, se definen los caudales de diseño a partir de un modelo lluvia escorrentía, en el que se obtienen valores máximos de caudal para TR2 (2,5 m3/s), TR25 (14,3 m3/s) y TR50 (21,10 m3/s).
- El río Molinero en el sector de estudio se caracteriza por presentar profundidades de flujo entre 0,24 m hasta 2,68 m y velocidades máximas de flujo entre 2,50 m/s hasta 4,70 m/s para periodos de retorno entre 2,33 y 50 años.
- Las profundidades de socavación general del río Molinero a lo largo del tramo de análisis para los periodos de retorno de 2,33 y 50 años oscilan entre 0,20 m y 1,90 m.
- Los suelos circundantes a la zona del proyecto presentan deficiencias en el drenaje superficial, atribuibles a una alta escorrentía hacia la zona del proyecto. La topografía de la región se caracteriza por una inclinación pronunciada en las márgenes y taludes del río, y una morfología relativamente plana en la parte superior. Esta configuración genera problemas de acumulación e infiltración de aguas superficiales tanto en la parte alta como en el cuerpo de las márgenes y taludes del río Molinero. Dichas condiciones se ven agravadas por la ausencia de sistemas de drenaje adecuados para manejar las aguas superficiales provenientes de la vía de acceso sin pavimentar.
- La zona de estudio presenta diversas problemáticas geotécnicas, tanto externas como inherentes a sus características naturales. Entre los factores más relevantes se encuentran: la inclinación pronunciada de la pendiente topográfica en los taludes, la falta de confinamiento adecuado en las márgenes y taludes del río Molinero, y la presencia de materiales no consolidados en el terreno. Adicionalmente, la socavación generada por el río en las márgenes y taludes, junto con las infiltraciones de aguas superficiales en la parte superior y el cuerpo del talud, exacerban la inestabilidad del área. La ausencia de sistemas de drenaje superficial adecuados agrava esta situación, convirtiéndose en uno de los principales desafíos a superar para garantizar la estabilización efectiva de la zona de estudio.
- Los resultados de los factores de seguridad calculados en los análisis de estabilidad realizados para las dos (2) secciones definidas en condiciones actuales indican que los taludes analizados se encuentran en un estado de estabilidad parcial. Aunque no se observan fallas profundas o movimientos de gran magnitud, se evidencia una falla superficial relativamente limitada. Sin embargo, los factores de seguridad moderados no garantizan la estabilidad a largo plazo bajo las condiciones actuales. Por lo tanto, es

imprescindible implementar medidas de mitigación, que incluyan diseño y construcción de estructuras de protección contra la socavación del río Molinero en el sector, empradización y reforestación de los taludes existentes que carecen de cobertura vegetal, así como de aquellos generados durante la reconformación del terreno, y construcción de sistemas de drenaje superficial en la vía sin pavimentar ubicada en la parte alta de la zona de estudio, diseñados para captar, conducir y descargar de manera técnica las aguas lluvias y de escorrentía, ya sea hacia el sistema de alcantarillado del sector o directamente al cauce del río Molinero, minimizando el impacto sobre la estabilidad del terreno.

- De acuerdo con las condiciones topográficas de la zona de estudio, las características de los materiales existentes, los resultados de los análisis de estabilidad del talud en condiciones actuales, y para controlar la socavación en los taludes de la zona de estudio, se recomienda construir un tablestacado en la margen derecha del río Molinero, aguas abajo, en una longitud de 53 m, entre las abscisas km0+089 al Km0+142, y otro tablestacado en la margen izquierda del río Molinero, aguas abajo, en una longitud de 28 m, entre las abscisas km0+095 al Km0+123, que garantice la estabilidad de los taludes de estos tramos con bajas deformaciones. El Diseño de obras de drenaje en la vía sin pavimentar para gestionar eficientemente las aguas superficiales y minimizar su impacto en la estabilidad del terreno. Estas acciones buscan controlar los procesos de socavación, garantizar la estabilidad del área de estudio y proteger los elementos vulnerables expuestos.
- Con base en los resultados de los factores de seguridad básicos mínimos directos, se determinó que los factores de seguridad calculados para los taludes de la zona de estudio en condiciones finales, es decir, considerando la implementación del sistema de tablestacado, superan los valores mínimos establecidos en la Tabla H.2.4-1 de la NSR-10 para la etapa de diseño. Esto confirma la viabilidad técnica del diseño del tablestacado proyectado, asegurando su capacidad para cumplir con los requisitos de estabilidad y seguridad estructural definidos por la normativa vigente.
- Los trabajos a realizar para la construcción del tablestacado, se deben ejecutar en una época de estiaje, para que las aguas del río Molinero, no interfieran en los trabajos a realizar.
- De acuerdo con las características litológicas, las propiedades geomecánicas del perfil del terreno y el comportamiento hidráulico del subsuelo explorado en la zona de estudio, se concluye que no se identifican inconvenientes geotécnicos significativos que puedan afectar desfavorablemente la construcción del tablestacado proyectado. Estas condiciones garantizan un entorno adecuado para la implementación de la solución propuesta desde el punto de vista técnico y geotécnico.

4 RECOMENDACIONES

- Se recomienda ejecutar en el corto plazo la construcción de las medidas de mitigación presentadas en este estudio, para dar pronta solución a los habitantes del sector, mitigar el riesgo y evitar alguna eventualidad que potencie la amenaza de represamiento del río Molinero.
- Antes de la construcción de las obras, es importante realizar una actualización topográfica de cada una de las obras de estabilización recomendadas antes de iniciar su construcción. Dado que los terrenos en la zona de estudio no son completamente estables, existe la posibilidad de que se produzcan cambios en la topografía del área debido a movimientos superficiales o ajustes en el terreno. Por lo tanto, será imprescindible actualizar los datos topográficos justo antes de ejecutar las obras de contención, asegurando que el diseño se ajuste a las condiciones reales del terreno en el momento de su construcción, y garantizando así la precisión y efectividad de las intervenciones proyectadas.
- Se recomienda que el tablestacado proyectado, se construya con las dimensiones dadas en este informe, y en los planos de diseño, para de esta manera garantizar su estabilidad y vida útil.
- Previo a la construcción del tablestacado proyectado, será necesario realizar el perfilado de los taludes, eliminando exclusivamente el material suelto presente. Este procedimiento tiene como objetivo reducir el peso y los empujes de tierra sobre los taludes, facilitando la ejecución controlada de los cortes y excavaciones requeridos para la instalación del tablestacado. Una vez concluida la construcción del tablestacado, se procederá a la construcción de zanjas y cunetas en ambos costados y márgenes del río Molinero, destinadas a canalizar de manera eficiente las aguas superficiales y de escorrentía. Finalmente, se llevará a cabo la empradización de los taludes generados durante las obras, así como de aquellos perimetrales a la zona de estudio que carezcan de cobertura vegetal, utilizando bloques de césped para estabilizar el terreno y prevenir la erosión.
- Con base en los análisis de estabilidad, se debe retirar parte del material suelto que se encuentra en los taludes de la zona de estudio, luego realizar una excavación de 2 m de altura, 1 m de base, y 1,5 m en la parte superior, dejando un ángulo de corte de 76°, es decir que se debe excavar desde la cota 2522,2 m.s.n.m., la cual es la cota de la rasante de la vía sin pavimentar en la margen derecha del río, y de la rasante de las zonas baldías en la margen izquierda del río, hasta la cota 2520,2 m.s.n.m; para de esta manera hincar y/o instalar los pilotes en madera, en las dos (2) márgenes del río. Estos trabajos se deben ejecutar en una época de estiaje, para que las aguas del río Molinero, no interfieran en los trabajos a realizar.
- Para poder comenzar con la construcción del tablestacado proyectado en la margen derecha del río, se puede acceder por la vía de acceso sin pavimentar existente en la parte superior de este talud; y para la construcción del tablestacado proyectado en la margen izquierda del río, se puede acceder por el puente en madera existente, que comunica la vía sin pavimentar con las edificaciones existentes en la parte superior de este talud.

- Las profundidades de socavación general del río Molinero a lo largo del tramo de análisis, para los periodos de retorno de 2,33 y 50 años, varían entre 0,20 m y 1,90 m. Se recomienda que el nivel de cimentación de las obras de protección o encauzamiento se ubique por debajo de las profundidades de socavación estimadas en este estudio, con el fin de garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras frente a los efectos erosivos a lo largo del tiempo.
- Desde el punto de vista de la estabilidad de los taludes, no se recomienda realizar los cortes necesarios para la construcción del tablestacado en una sola etapa o sin la implementación de medidas de protección y/o contención temporal. Para garantizar una mayor estabilidad en los cortes y taludes de ambas márgenes del río, los trabajos deben ejecutarse por tramos no superiores a 2 m, mientras se avanza simultáneamente en la construcción del tablestacado. Los cortes realizados no deben quedar expuestos a la intemperie, por lo que se debe emplear una cubierta, como plástico de uso industrial, con el fin de prevenir la erosión y meteorización de los taludes de corte. Esta medida contribuirá a mantener la estabilidad de los taludes mientras se ejecuta la construcción del tablestacado proyectado.
- El proceso de compactación del material de relleno se debe hacer desde el frente hacia atrás, para evitar presiones excesivas sobre los palos y/o pilotes del tablestacado, y se debe utilizar compactadores manuales, tales como saltarines o ranas, y compactadores mecánicos como vibro compactadores, para de esta manera darle una mayor estabilidad y vida útil al tablestacado proyectado.
- Se recomienda construir zanjas y/o cunetas en ambos costados de la vía sin pavimentar en la margen derecha, y la construcción de zanjas y/o cunetas en la parte superior del talud de la margen izquierda, las cuales deben ser totalmente impermeabilizadas con concreto, piedra pegada y/o geomembrana de polietileno, con el fin de no permitir que estas sirvan como elementos de filtración de agua al cuerpo de los taludes, y al tablestacado proyectado, de tal forma que capten, conduzcan y descarguen técnicamente las aguas superficiales al sistema de alcantarillado del sector o directamente al cauce del río Molinero.
- Se recomienda realizar un sellado de las grietas existentes o las generadas durante el proceso de construcción del tablestacado y de las obras de drenaje necesarias, con material arcilloso, evitando infiltraciones de aguas lluvias y de escorrentía superficial a través de estas, y de esta manera aumentar la estabilidad de esta zona de estudio, y del tablestacado proyectado.
- El material producto de los cortes y/o excavaciones para la construcción del tablestacado proyectado, se debe retirar inmediatamente de la zona de estudio, y buscar un sitio apropiado para su disposición final.
- Todos los materiales utilizados durante la construcción de las obras propuestas, deberán cumplir con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de 2022.
- Las redes hidráulicas que se implanten, se deben construir flexibles y herméticas para absorber deformaciones causadas por reacomodación de las estructuras y principalmente por efectos sísmicos, y para evitar infiltraciones de agua en el suelo; se recomienda que las redes se apoyen sobre una capa de relleno de espesor mínimo de

0,15 m, compactada técnicamente, de las mismas características de un relleno tipo afirmado (A-38).

- Bajo ninguna circunstancia se debe permitir la descarga de aguas superficiales en las zonas aledañas a la zona de estudio una vez construido el tablestacado proyectado.
- Se recomienda verificar que las edificaciones existentes en la parte superior del talud de la margen derecha del río, no estén descargando las aguas domésticas y/o servidas hacia la parte baja del talud en estudio, para de esta manera darle una mayor estabilidad y vida útil al tablestacado proyectado en este sector.
- Para la construcción del tablestacado, se deben tener en cuenta todas las especificaciones técnicas, contempladas en el artículo 622-13 del Invias.
- Durante la construcción del proyecto se debe causar el menor impacto ambiental, y se debe sembrar arbustos ornamentales y/o nativos alrededor del proyecto, para su mejor y mayor adaptación.
- Antes de la construcción de las obras proyectadas, se debe realizar un inventario del estado actual de las edificaciones, lotes, y vías vecinas, con su respectivo registro fotográfico, lo cual deberá quedar escrito y registrado en el acta de vecindad, para el caso de reclamaciones posteriores.
- Se recomienda programar una visita del Ingeniero Geotecnista durante la construcción de las obras proyectadas, con el fin de inspeccionar el proceso de excavación y aprobación del suelo de fundación del tablestacado.
- Se recomienda que todo el personal que se involucre en la construcción de la obra, cumpla con los lineamientos normativos respectivos de seguridad y salud en el trabajo, como la utilización de elementos personales de protección, afiliación a seguridad social y riesgos laborales, además de la realización de capacitaciones de prevención de accidentes laborales.
- Se recomienda desde la oficina de gestión del riesgo del municipio de Sogamoso, mientras se otorga el permiso de ocupación de cauce por parte de la autoridad ambiental, realizar seguimiento, control y monitoreo en esta sección del rio Molinero, para establecer cambios en las dinámicas del cauce y de las condiciones actuales que allí se presentan

5 BIBLIOGRAFÍA

Chow Ven Te (1994) “Hidrología Aplicada” Mc Graw Hill

Chow Ven Te (1994b) “Hidráulica de Canales Abiertos” Mc Graw Hill

Das, B. M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Cuarta Edición. México D.F.: Thomson-Learning.

Gerscovich, D. M. (2012). Estabilidad de Taludes. Sao Paulo, Brasil: Lemoine Editores.

IDEAM (2007) “Protocolo Para El Monitoreo Y Seguimiento Del Agua”

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayos para materiales de carreteras. Bogotá D.C.: INVIAS.

Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), ley 400 de 1997 (modificada ley 1229 de 2008), Decreto 926 del 19 de marzo de 2010. Bogotá, D.E., Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS.

Monsalve Germán (1999) “Hidrología en la Ingeniería” Alfaomega.

Statistical methods in hydrology Charles thaan

Suárez, J. (2009). Deslizamientos, Análisis Geotécnico (Vol. 1). Bucaramanga, Colombia: División de Publicaciones UIS.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (2016) HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 5.03.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. (2009), HEC-GeoHMS User’s Manual. Version 4.2.

Vargas, M. D. (1996). Ingeniería de Fundaciones-Fundamentos e introducción al Análisis Geotécnico. Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Villalaz, C. C. (1994). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México D.F.: Limusa S.A