



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732

PROYECTO DE DESARROLLO COMUNITARIO



**Aquí y
Ahora**



SANTOTOTUNJA.EDU.CO
NIT. 860.012.357-6



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD
BAJO CONDICIONES CRÍTICAS DE HUMEDAD.

CRISTIAN ANDRÉS BARÓN ARIAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS- SECCIONAL TUNJA

ESP. GEOTECNIA VIAL Y PAVIMENTOS

TUNJA, BOYACÁ

2025



TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404
Campus Centro Histórico: Cl. 19 N° 11 - 64 · Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno O.P.: Av. Universitaria Cl. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106





SANTOTOTUNJA.EDU.CO
NIT. 860.012.357-6



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD
BAJO CONDICIONES CRÍTICAS DE HUMEDAD.

CRISTIAN ANDRÉS BARÓN ARIAS

DIRECTOR:

ING. MILTON FERNANDO BALLESTEROS BARRETO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS- SECCIONAL TUNJA

ESP. GEOTECNIA VIAL Y PAVIMENTOS

TUNJA, BOYACÁ

2025



TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404
Campus Centro Histórico: Cl. 19 N° 11 - 64 · Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno O.P.: Av. Universitaria Cl. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106



Contenido

Introducción	14
Objetivos.....	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Marco Teórico.....	16
Ladera y sus principales partes	16
Tipos de Deslizamientos	17
Deslizamiento Traslacional.....	18
Deslizamiento Rotacional.	19
Variación en la Consistencia del Suelo.....	20
Factor De Seguridad	20
Métodos Para el Cálculo del Factor de Seguridad	21
Métodos de Equilibrio Límite.....	22
Métodos Numéricos	24
Variables que Generan la Falla de un Talud.....	25
Dimensiones de los Movimientos.....	27
Curva Característica de los Suelos.....	28



Metodología	30
Recolección de Información General.....	30
Levantamiento Topográfico.....	30
Investigación de Campo.....	30
Ensayos de Laboratorio.....	30
Modelación Numérica.....	31
Análisis de Resultados y Elaboración del Documento Final	31
Generalidades.....	32
Localización Área de Estudio	32
Accesibilidad a Nivel Geográfico.....	33
Topografía Regional y Variación de Pendientes.	34
Topografía Regional	34
Condiciones Geológicas y Geomorfológicas.....	36
Geología Regional	36
Geología Local.....	37
Geomorfología	40
Hidrografía.....	43



Subcuenca de la Quebrada La Isla.....	43
Subcuenca del Río Juyasia.....	45
Clima.....	45
Amenazas.....	46
Estudio Geotécnico del Talud.....	48
Análisis de Precipitación.....	48
Precipitación Media- Método Polígonos de Thiessen	48
Exploración Geotécnica	51
Topografía Local y Secciones de Análisis.....	55
Ensayos de Laboratorio.....	57
Ensayo Limites de Atterberg	57
Ensayo de Granulometría.....	58
Resultados de laboratorio.....	62
Sondeo 1.....	62
Sondeo 2.....	66
Cálculo del Volumen del Deslizamiento	70
Resultados de la Investigación Experimental	71



Contenido Granulométrico.....	71
Sondeo 1.....	71
Sondeo 2.....	72
Variación de la Humedad y los Límites de Consistencia	74
Sondeo 1.....	74
Sondeo 2.....	75
Variación de la Resistencia Mediante Ensayo de Corte Directo	77
Sondeo 1.....	77
Sondeo 2.....	77
Análisis de los Parámetros Geomecánicos	79
Profundidad de Falla.....	81
Perfil Geotécnico y Perfiles de Análisis	83
Secciones de Modelación.....	83
Análisis de Estabilidad por Modelación Numérica	85
Análisis de Condiciones Normales- Secciones de Máxima Pendiente.....	85
Sección 1 de Máxima Pendiente.....	86
Sección 2 de Máxima Pendiente.....	88



Análisis bajo condiciones de saturación total- Secciones de Máxima Pendiente.....	89
Sección 1 de máxima pendiente.....	91
Sección 2 Máxima Pendiente.....	93
Análisis bajo condiciones de Saturación Total y Sismo- Secciones Máxima Pendiente.....	94
Sección 1 de Análisis.....	97
Sección 2 de Análisis.....	98
Estabilización del talud.....	99
Drenes Horizontales Sección 1- Máxima Pendiente.....	100
Drenes Horizontales Sección 1- Máxima Pendiente.....	101
Conclusiones.....	103
Recomendaciones.....	105
Bibliografía.....	106



Tabla de Figuras

Figura 1 Partes Generales de una Ladera.....	16
Figura 2 Principales Partes de un Deslizamiento.....	17
Figura 3 Deslizamiento Traslacional	18
Figura 4 Deslizamiento Rotacional.....	19
Figura 5 Estados de Consistencia del Suelo	20
Figura 6 Factores Desencadenantes de la Falla de Taludes.....	26
Figura 7 Dimensiones de Movimientos en Masa.....	27
Figura 8 Curvas Característica de los Suelos.....	29
Figura 9 Ubicación del Municipio de Viracachá.....	32
Figura 10 Condiciones Topográficas del Municipio	34
Figura 11 Variaciones de Pendiente	35
Figura 12 Formaciones Geológicas de la Zona en Estudio	38
Figura 13 Condiciones Geomorfológicas del Municipio.....	41
Figura 14 Cuerpos de Agua Municipio Viracachá	44
Figura 15 Precipitaciones Mensuales del Área de Influencia.....	46
Figura 16 Zonificación de Amenazas en el Municipio.....	47
Figura 17 Distribución Espacial Precipitación	49
Figura 18 Ejecución Sondeo 1	51
Figura 19 Perfil Sondeo 1	52



Figura 20 Ejecución Sondeo 2	53
Figura 21 Perfil Sondeo 2	54
Figura 22 Planimetría del Talud	56
Figura 23 Ensayo de Límites de Consistencia	57
Figura 24 Tamices para el Ensayo de Granulometría.....	58
Figura 25 Ensayo de Hidrometría.....	59
Figura 26 Muestras para el Ensayo de Gravedad Específica.....	60
Figura 27 Muestras Resultantes de Ensayo de Corte Directo.....	61
Figura 28 Cálculo del Volumen de Deslizamiento.....	70
Figura 29 Distribución Granulométrica Sondeo 1	72
Figura 30 Distribución Granulométrica Sondeo 2	73
Figura 31 Consistencia del Suelo Sondeo 1.....	75
Figura 32 Consistencia del Suelo Sondeo 2.....	76
Figura 33 Variación de la Cohesión	77
Figura 34 Variaciones del Ángulo de Fricción.....	79
Figura 35 Cambio en las Condiciones de Humedad.....	82
Figura 36 Perfil Geotécnico del Talud en Análisis.....	84
Figura 37 Estabilidad Global mediante Equilibrio Límite- Sección 1 (Terreno)- Slide.....	86
Figura 38 Estabilidad Global Mediante Elementos Finitos- Sección 1 (Terreno)-Plaxis.....	87
Figura 39 Estabilidad Global mediante Equilibrio Límite- Sección 2 (Terreno)- Slide.....	88



Figura 40 Estabilidad Global Mediante Elementos finitos- Sección 2 (Terreno).....	89
Figura 41 Estabilidad Global Equilibrio Limite- Sección 1 (Condiciones de Saturación)- Slide	91
Figura 42 Estabilidad Global Mediante Elementos Finitos- Sección 1(Condiciones de Saturación)- Plaxis.....	92
Figura 43 Estabilidad Global mediante Equilibrio Límite- Sección 2 (Condiciones de Saturación)- Slide	93
Figura 44 Estabilidad Global Mediante Elementos Finitos- Sección 2 (Condiciones de Saturación)-Plaxis.....	94
Figura 45 Estabilidad Global Equilibrio Limite- Sección 1(Condiciones de Saturación+ Sismo)- Slide	97
Figura 46 Estabilidad Global Mediante Equilibrio Limite- Sección 2 (Condiciones de Saturación+ Sismo)	98
Figura 47 Instalación de Drenes Horizontales- Sección 1	101
Figura 48 Instalación de Drenes Horizontales- Sección 2.....	102
Figura 49 Localización del Proyecto en Estudio	111
Figura 50 Curva Granulométrica Sondeo 1- Estrato 1	119
Figura 51 Curva Hidrometría Sondeo 1- Estrato 1	119
Figura 52 Curva Granulométrica Sondeo 1- Estrato 2	120
Figura 53 Curva Hidrometría Sondeo 1- Estrato 2	120
Figura 54 Curva Granulométrica Sondeo 2-Estrato 1	121



Figura 55 Curva Hidrometría Sondeo 2- Estrato 1 121



Lista de Tablas

Tabla 1 Factores de Seguridad Mínimos Directos	21
Tabla 2 Métodos de Equilibrio Límite Para el Análisis de Taludes	22
Tabla 3 Métodos de Modelación Numérica	24
Tabla 4 Tiempos de Traslado.....	33
Tabla 5 Estaciones Climatológicas	48
Tabla 6 Cálculo Precipitación Media.....	50
Tabla 7 Cantidad de Ensayos de Laboratorio	55
Tabla 8 Propiedades Típicas de Suelos y Rocas	80
Tabla 9 Datos de Entrada Modelación en Condiciones Normales.....	85
Tabla 10 Datos de Entrada Modelación en Condiciones de Saturación Total.....	90
Tabla 11 Datos de Entrada Modelación en Condiciones de Saturación Total y Sismo.....	95
Tabla 12 Coeficientes Sísmicos del Municipio de Viracachá.....	96
Tabla 13 Resultados de Factores de Seguridad.....	99
Tabla 14 Datos de Precipitación Mensual Estación Rondón	113
Tabla 15 Datos de Precipitación Mensual Estación Ramiriquí.....	113
Tabla 16 Datos de Precipitación Mensual Estación Siachoque	114
Tabla 17 Datos de Precipitación Mensual Estación Pila la Finca.....	114
Tabla 18 Datos de Precipitación Mensual Estación Villa la Luisa	115



Introducción

Las laderas pueden presentar diversos tipos de inestabilidad, como movimientos rotacionales, traslacionales o a gran escala, dependiendo de los parámetros topográficos, geotécnicos e hidrológicos del sector (Hernández Chaverra et al, 2019). Estos fenómenos de remoción en masa, provocados por múltiples factores, impactan directamente no solo en el ámbito socio-económico, sino que también afectan la movilidad vehicular y en ocasiones generan directa afectación en edificaciones y obras civiles en general. Esto resalta la importancia de realizar análisis y modelaciones para determinar el factor de seguridad y, consecuentemente, el grado de estabilidad de un talud o ladera (Requelme Sáenz, 2012).

Este proyecto se centra en un estudio geotécnico en el km 2+800 de la vía secundaria que conecta los municipios de Viracachá, Boyacá y Ciénega, Boyacá. Se obtuvieron variables representativas mediante investigación de campo y ensayos de laboratorio, lo que permitió caracterizar los materiales del sector estudiado. Con estos datos, se realizó una modelación numérica utilizando el software Plaxis y Slide, para simular las condiciones actuales de la ladera, con el fin de determinar su factor de seguridad.

El objetivo principal de esta investigación es emitir un concepto técnico que defina el nivel de riesgo al que se enfrenta la comunidad al transitar por este sector. Además, se busca proponer una alternativa que mejore las condiciones socioeconómicas y reduzca el riesgo actual derivado de los procesos de remoción en masa, particularmente en períodos de alta precipitación.



Objetivos

Objetivo General

- Evaluar la condición de estabilidad de una ladera en suelo sometida a condiciones críticas de humedad mediante la determinación de variaciones de humedad a partir de ensayos de laboratorio y modelación numérica.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades geomecánicas de los materiales presentes mediante una campaña de exploración en campo y de laboratorio.
- Analizar el comportamiento geotécnico de la ladera mediante la determinación de su factor de seguridad, utilizando modelación numérica a través de los softwares Plaxis y Slide.
- Establecer recomendaciones técnicas para la ladera según los resultados del análisis geotécnico y las condiciones críticas de humedad identificadas.



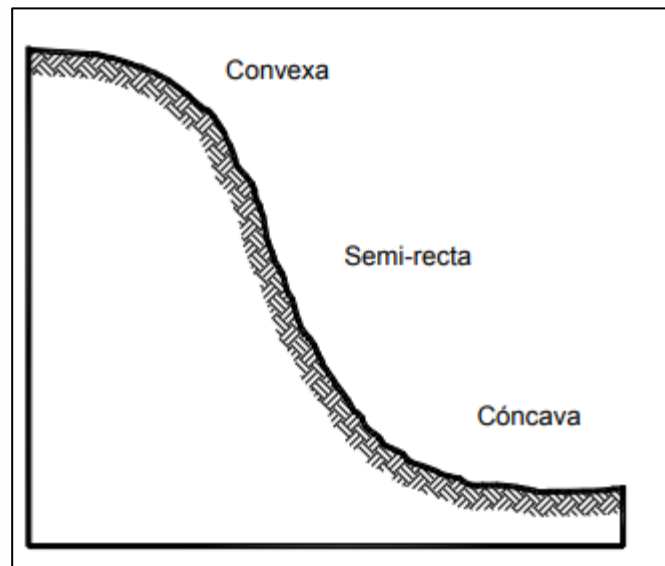
Marco Teórico

Ladera y sus principales partes

La ladera corresponde a una masa de tierra que presenta una pendiente o cambios significativos de altura, teniendo en cuenta que su conformación se da por un proceso natural, es decir, sin intervención antrópica, (Suarez Díaz, 2012). En términos generales, es posible identificar tres secciones principales en el perfil característico de una ladera (Figura 1). En su parte superior, se observa una forma convexa donde predomina la actividad erosiva. La sección media se caracteriza por tener una configuración más bien recta, siendo esta zona donde prevalece el desplazamiento de materiales.

Figura 1

Partes Generales de una Ladera



Nota: Se muestran las principales partes con las que se cuenta en una ladera. Tomado de *Deslizamientos*. Tomo I: *Análisis Geotécnico* (p.03), por (Suarez, 2012).



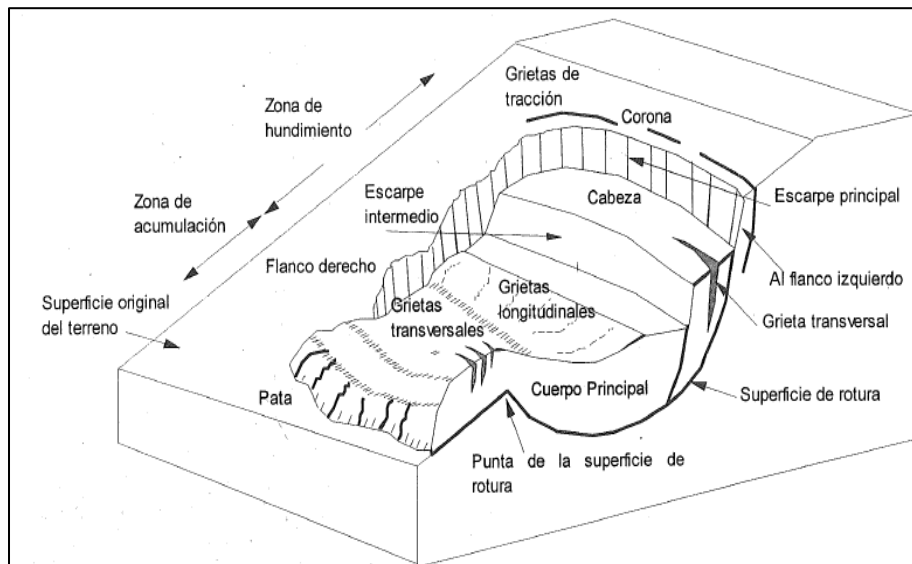
Finalmente, la región inferior exhibe una forma cóncava, la cual actúa como área de acumulación donde se depositan los sedimentos que han sido desplazados desde las zonas más elevadas de la pendiente.

Tipos de Deslizamientos

El desplazamiento de una porción de suelo ocurre a lo largo de una zona de falla, la cual puede identificarse mediante análisis lógico que permite clasificarlo como deslizamiento rotacional o traslacional (Invías, 1998) . En estas zonas (Figura 2) se observan escarpes principales y/o secundarios, cuerpo del deslizamiento y pata del talud, que facilitan el dimensionamiento de los movimientos en masa.

Figura 2

Principales Partes de un Deslizamiento



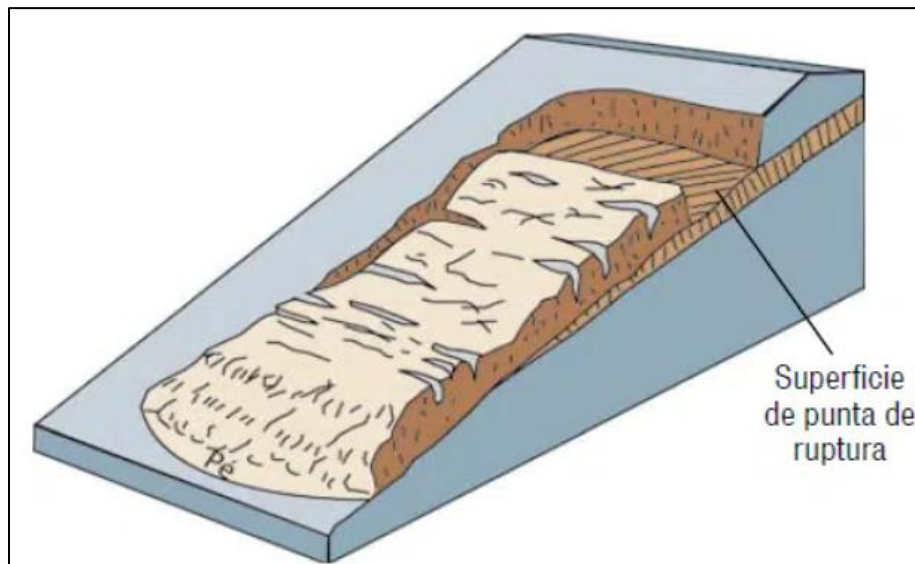
Nota: El gráfico muestra las partes principales de un proceso de remoción en masa. Tomado de *Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico* (p.04), por (Suarez Díaz, 2012).

Deslizamiento Traslacional

El deslizamiento traslacional ocurre sobre una superficie de ruptura plana u ondulada (Figura 3), donde los elementos de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y en trayectorias paralelas. La masa puede fragmentarse conforme avanza, especialmente si aumenta su velocidad, transformándose en un flujo, (Corominas, 2015). Según (Hutchinson, 1988), citado por (Montero Olarte, 2017), este tipo de deslizamiento implica una fractura por corte a lo largo de una superficie casi plana en dirección de la pendiente, que puede concentrarse en una sección transversal.

Figura 3

Deslizamiento Traslacional



Nota: La figura muestra la forma como se desarrolla un deslizamiento traslacional. Tomado de *Landslide Types and Processes* (p.03), por (Highland, 2016).



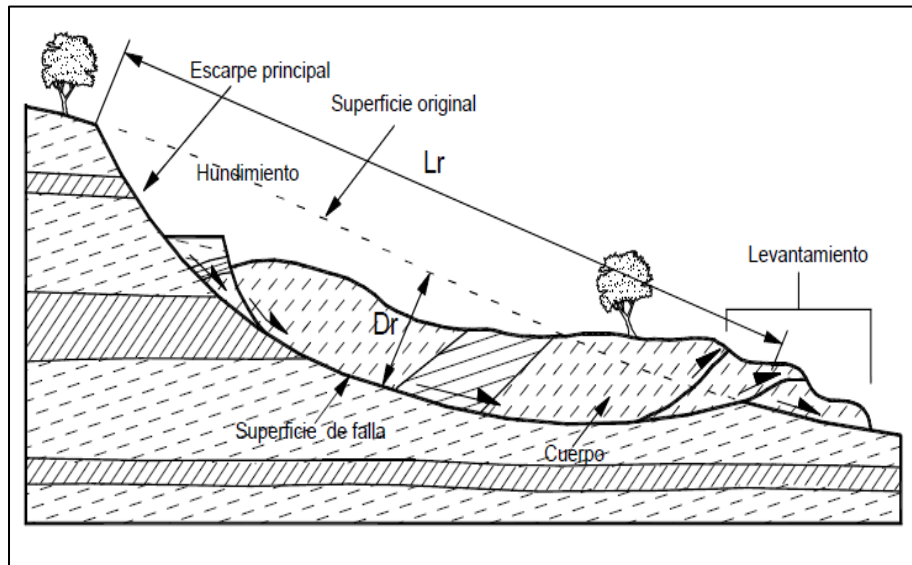
Deslizamiento Rotacional.

Se produce el desplazamiento del material alrededor de un eje paralelo a la superficie de suelo y a lo largo de una superficie de falla circular (Figura 4). La velocidad en el desarrollo de los movimientos rotacionales varía de acuerdo a las magnitudes de lluvia, (Highland, 2016).

Durante este tipo de deslizamiento, la masa desplazada tiende a inclinarse contra el escarpe principal, generando depresiones donde se puede acumular agua que, a su vez, puede acelerar el proceso de falla.

Figura 4

Deslizamiento Rotacional



Nota: La figura muestra las principales partes de un deslizamiento rotacional. Tomado de Deslizamientos Tomo I: Análisis Geotécnico (p.015), por (Suarez Díaz, 2012).

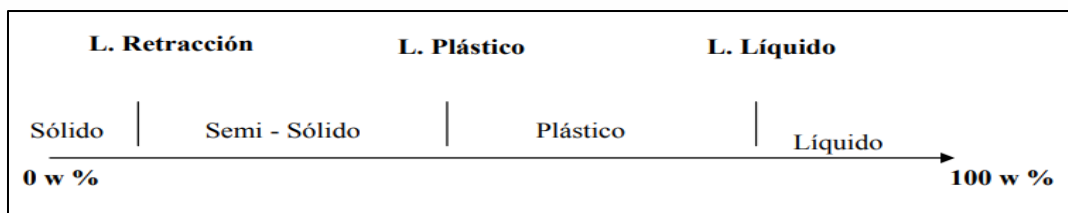


Variación en la Consistencia del Suelo

Los límites de Atterberg o de Consistencia son parámetros geotécnicos fundamentales en la caracterización de suelos finos, que definen los estados físicos del suelo en función de su contenido de humedad (Figura 5),(Puy Santín, 2005)

Figura 5

Estados de Consistencia del Suelo



Nota: Los estados de consistencia del suelo se definen con base en los Límites de Atterberg; fundamentales a su vez para establecer el cambio del suelo ante distintas condiciones de humedad. Tomado de Capítulo 1 (p.02) por (Puy Santín, 2005)

Factor De Seguridad

El objetivo de cualquier estudio en la estabilidad de taludes, es la de encontrar el factor de seguridad, correspondiente a la relación entre las fuerzas actuantes y resistentes con las que cuenta el suelo, basado en parámetros geomecánicos como lo son la cohesión y el ángulo de fricción. (Das, 2015). La magnitud de este parámetro puede estar afectada por las variaciones de humedad presentes en el material.

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \text{ Ec. 1}$$

De acuerdo con la metodología implementada para el cálculo de esta relación, se deberá obtener un valor específico, cuya magnitud según la Norma Sismo Resistente (NSR-10) en su título H.2.4.3, debe cumplir con los rangos establecidos en la tabla 1, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el suelo.

Tabla 1

Factores de Seguridad Mínimos Directos

Condición	F _{SBM}		F _{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta+ Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta+ Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta+ Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00	No se permite	No se permite
Taludes- Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes- Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente sísmico de Diseño	1.05	1.00	No se permite	No se permite

Nota: En la NSR 10 se tiene un rango establecido de factores de seguridad, según las distintas solicitaciones impuestas al suelo. Tomado de (Minambiente, 2010).

Métodos Para el Cálculo del Factor de Seguridad

La determinación de la relación entre las fuerzas actuantes y resistentes en un talud se puede encontrar mediante métodos de modelación numérica o métodos de equilibrio límite, siendo estos



últimos ampliamente utilizados en la ingeniería geotécnica por su simplicidad y capacidad para evaluar la estabilidad de laderas.

Métodos de Equilibrio Límite

Las teorías de equilibrio límite (Tabla 2) utilizan principios de estática para evaluar la estabilidad de masas de suelo potencialmente inestables. Sin embargo, estas presentan una importante desventaja, dado que asumen que la resistencia al cizallamiento del suelo se activa completa y uniformemente en toda la superficie de ruptura. Estas metodologías no consideran las condiciones tensionales ni la magnitud de las deformaciones en el terreno. (Sanz et al., 2015).

Estos métodos están basados en la suposición de que el talud se divide en rebanadas o dovelas, considerando que el factor de seguridad puede ser determinado con base a las propiedades de resistencia al corte y la topografía del terreno. (Mesa Lavista et al., 2020).

Tabla 2

Métodos de Equilibrio Límite Para el Análisis de Taludes

Métodos de Equilibrio Límite	Hipótesis
Fellenius (Ordinario) (1927)	Supone que las fuerzas entre rebanadas se anulan entre sí. Solo para deslizamiento circular.
Bishop Modificado (1955)	La fuerza resultante entre rebanadas es horizontal (significa que no hay fuerza tangencial entre rebanadas) Solo para deslizamiento circular
Janbu Generalizado (1968)	La posición de la fuerza normal entre rebanadas se define con la línea de empuje y se puede variar, es decir cambiar la posición de las fuerzas resultantes entre rebanadas. Para Cualquier superficie de deslizamiento



Métodos de Equilibrio Límite

Hipótesis

Spencer (1967)	Las fuerzas resultantes entre rebanadas son paralelas. Cualquier superficie de deslizamiento.
Morgenstern-Price (1965)	La dirección de las fuerzas resultantes entre rebanadas se define mediante la función predeterminada y se puede variar la orientación, el porcentaje de la función utilizada se resuelva mediante equilibrio de fuerzas y momentos. Cualquier superficie de deslizamiento.
GLE	La dirección de las fuerzas resultantes entre rebanadas se define mediante la función predeterminada, el porcentaje de la función requerido para satisfacer el equilibrio de momentos y fuerzas se define buscando el punto de intersección en el diagrama factor de seguridad vs porcentaje de la función.
Corps of Engineers (1970)	Las direcciones de las fuerzas resultantes entre rebanadas se suponen paralelas al ángulo medio de la superficie del talud o a la línea definida por los puntos de entrada y salida de la línea de deslizamiento en el terreno. Cualquier superficie de deslizamiento.
Lowe-Karafiath (1960)	Las direcciones de las fuerzas resultantes entre rebanadas se suponen iguales al promedio de la superficie del terreno y superficie de deslizamiento en la base de cada rebanada. Cualquier superficie de deslizamiento.
Sarma (1973)	Los valores de las fuerzas resultantes entre rebanadas siguen ciertas pautas predeterminadas. Cualquier superficie de deslizamiento.

Nota: En la tabla se observan las metodologías implementadas para la determinación del factor de seguridad en los taludes. Tomado de *Metodología*. (p.08) por (Ros Avila, 2008)



Estas técnicas se pueden aplicar a diferentes tipos de suelos y, aunque pueden sobrestimar levemente las cargas de falla, sus resultados son suficientemente precisos para aplicaciones prácticas. (Pérez De Ágreda, 2005).

Métodos Numéricos

Los métodos numéricos son técnicas computacionales que analizan taludes en suelo y roca (Tabla 3). Estos superan las limitaciones de los métodos tradicionales al considerar factores como geometría, propiedades del material, cargas dinámicas y la interacción suelo-estructura (Suarez Díaz, 2021).

Tabla 3

Métodos de Modelación Numérica.

Método	Características	Utilización
Elementos Finitos (FEM)	Se asume una malla de elementos con sus respectivos nodos y las propiedades elastoplásticas de los materiales	Se aplica a taludes que pueden considerarse como masas continuas sin bloques
Diferencias finitas (FDM)	Se elabora una malla con una variedad de relación esfuerzo-deformación.	Se utiliza para modelar masa rocosa con un alto grado de fracturación.
Elementos Distintos o Discretos (DEM)	Se divide en elementos con sus propiedades internas y de las uniones entre los elementos que se pueden mover libremente.	Se aplica para analizar inclinación de bloques.
Elementos de Borde (BEM)	Se discretizan las áreas para poder modelar la ocurrencia de agrietamientos en el talud.	Se utiliza para estudiar problemas de propagación de grietas

Nota: Los métodos numéricos permiten encontrar una relación de esfuerzo y deformación de los materiales.

Tomado de *Análisis de Estabilidad de Taludes* (p.27) por (Suarez Díaz, 2021).



En estas metodologías se aplica el método “phi-reduction”, con una reducción de la resistencia de todos los materiales, aplicando un factor de seguridad hasta alcanzar un valor en el cual el proceso no es convergente, (Sanz et al., 2015).

Variables que Generan la Falla de un Talud

Los desplazamientos en taludes o laderas resultan de diversos factores geológicos, geotécnicos, hidrológicos y ambientales. El estudio detallado de su superficie y profundidad permite diagnosticar la problemática y establecer medidas de estabilización, (Hernández Chaverra et al, 2019).

Los factores desencadenantes se clasifican principalmente en:

- Incremento de los esfuerzos de corte.
- Disminución de la resistencia al corte.

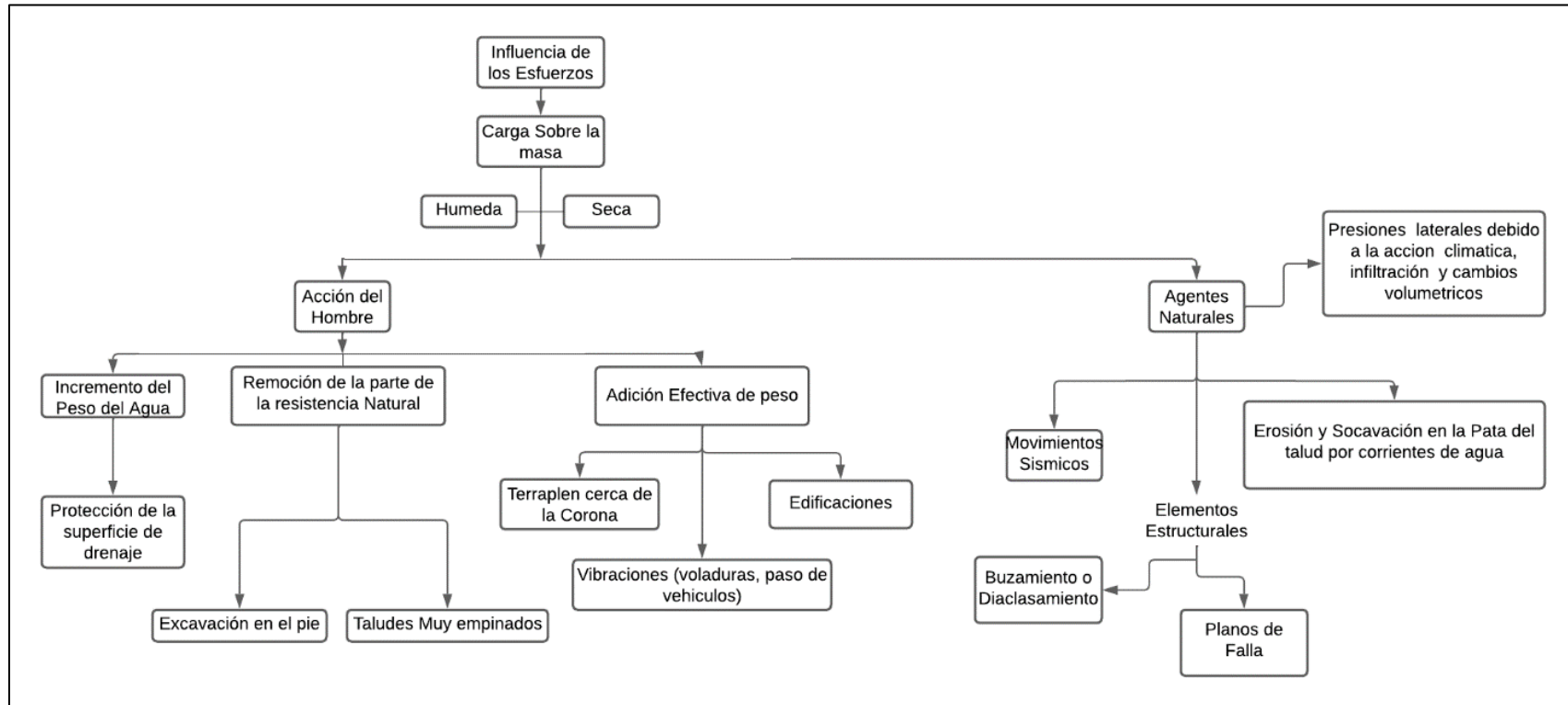
(Suarez, 2003) como se citó en (Requelme Sáenz, 2012) afirma lo siguiente:

“Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad. Un talud estable puede convertirse en un deslizamiento (p.27).



Figura 6

Factores Desencadenantes de la Falla de Taludes



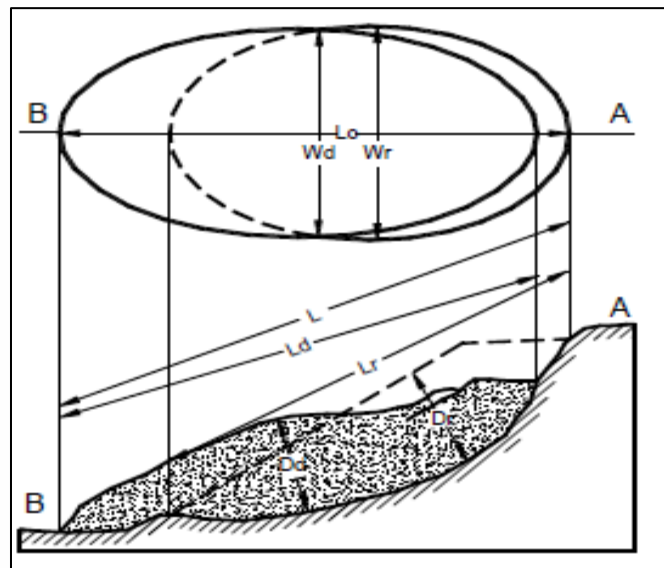
Nota: Se muestran las principales razones por las que se producen los deslizamientos y el aumento de los esfuerzos de corte. Tomado de *Manual de Estabilidad de Taludes*. (p.28), por (Invías, 1998).

Dimensiones de los Movimientos

En el estudio de procesos de remoción en masa, es crucial definir las dimensiones geométricas del deslizamiento (Figura 7), incluyendo las alturas de los escarpes y la extensión de la masa desplazada. El levantamiento topográfico resulta ser una herramienta fundamental para la medición de estos parámetros, proporcionando información esencial para cuantificar el volumen de material involucrado.

Figura 7

Dimensiones de Movimientos en Masa



Nota: Con las magnitudes de la ladera, se puede hallar la velocidad del flujo, así como la determinación del grado de amenaza y riesgo. Tomado de *Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico* (p.06), por (Suarez Díaz, 2012).

Para este cálculo, se utiliza la expresión definida por la ecuación 2 que incluye un factor de expansión que es utilizado debido a la dilatación del material.

$$Vol_{des} = \left(\frac{1}{6} \pi D_r * W_r * L_r \right) F_{ex} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Dr: Profundidad de la Superficie de Falla

Wr: Ancho de la Superficie de Falla

Lr: Longitud de la Superficie de Falla

Curva Característica de los Suelos

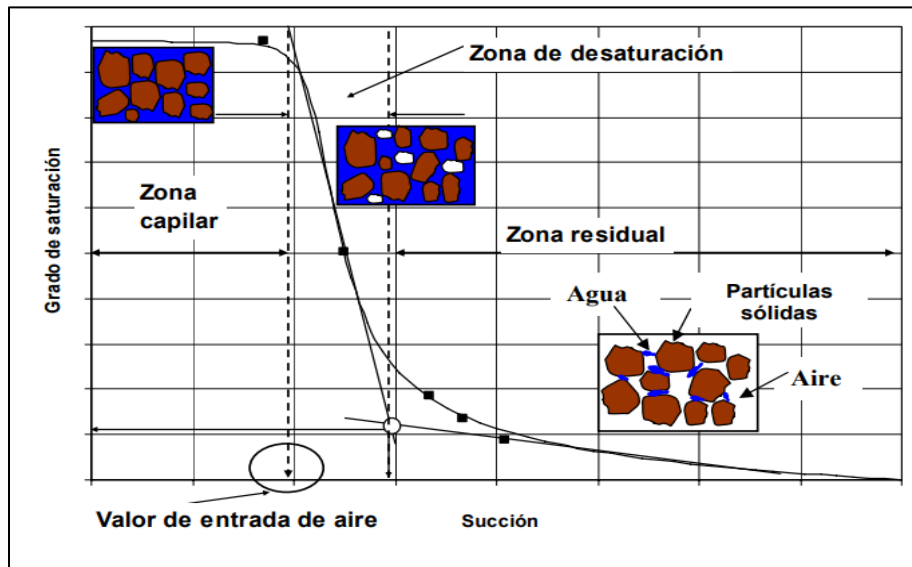
Se considera como la relación existente entre la succión o tensión del agua del suelo y el contenido de agua (Figura 8). El comportamiento de esta curva está directamente relacionado con las características granulométricas y la estructura mineralógica del suelo, (García Pérez, 2008). La curva característica se encuentra subdividida por tres zonas: La zona capilar, la zona de desaturación y la zona residual.

En primera medida (Fredlund, 1999), como se menciona en (García Pérez, 2008), establece que la zona capilar corresponde a aquella condición donde el suelo mantiene un estado de saturación, terminando en el valor de entrada del aire. Por otro lado, la zona de desaturación se caracteriza porque el agua sufre desplazamiento por el aire, es decir, que la fuerza de adherencia entre las partículas del suelo y el agua, se incrementa proporcionalmente a la pérdida de agua.

Finalmente, la zona donde se produce un incremento en la succión sin el cambio significativo en el contenido de agua, se conoce como “zona residual”. En esta fase el contenido de agua es mínimo, que prácticamente no fluye entre los poros.

Figura 8

Curvas Característica de los Suelos



Nota: En el gráfico se evidencian las etapas de la curva de succión; importantes para realizar el estudio a detalle del suelo. Tomado de *Determinación De Curvas Características En Suelos No Saturados Con Celdas De Presión* (p.08), por (García Pérez, 2008).

Metodología

El presente estudio se desarrolló mediante una metodología que combina un enfoque cuantitativo y cualitativo. El proceso se dividió en las siguientes fases:

Recolección de Información General

Recopilación de información detallada sobre las condiciones de la ladera, incluyendo datos topográficos, geológicos, geomorfológicos, hidrográficos e hidrológicos, tanto a nivel regional como local.

Levantamiento Topográfico

Obtención de información georreferenciada mediante GPS South RTK Galaxy G3 GPS RTK GNSS Receiver Base and Rover, de la ladera donde se produjo el deslizamiento y otros detalles relevantes del área, permitiendo la delimitación precisa de las secciones de análisis.

Investigación de Campo

Exploración directa en el cuerpo y pie de la ladera mediante dos sondeos a profundidades de 4.60 m y 8.60 m, utilizando equipos de perforación semi-mecánica.

En esta actividad, se extrajeron muestras tanto inalteradas como alteradas de los materiales presentes en el sitio para determinar las propiedades del suelo y las características necesarias para la construcción del perfil geotécnico.

Ensayos de Laboratorio

Ejecución de ensayos para la clasificación del suelo y la determinación de parámetros geomecánicos sobre las muestras obtenidas. Estos ensayos permitieron la caracterización del suelo

y la obtención de los parámetros necesarios para encontrar la relación entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes de la ladera en estudio.

Modelación Numérica

Se realizó un análisis de estabilidad utilizando los programas Plaxis y Slide para calcular el factor de seguridad. El estudio se basó en teorías de equilibrio de momentos y fuerzas, las cuales son aplicables a este caso específico.

Análisis de Resultados y Elaboración del Documento Final

Procesamiento y análisis de la información recolectada en las etapas anteriores, planteando los resultados encontrados e indicando una de las soluciones efectivas para mitigar las condiciones desfavorables presentes en el sitio.

Toda la información y los hallazgos se sintetizaron en el documento final de la investigación.

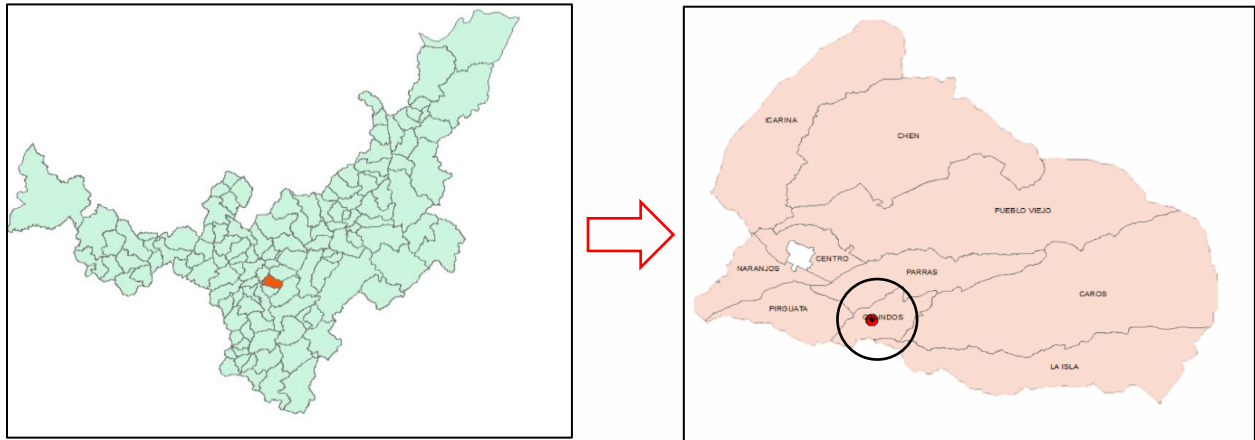
Generalidades

Localización Área de Estudio

El municipio de Viracachá está ubicado en la provincia de Márquez, departamento de Boyacá, y tiene una superficie de 68 km². Se divide en 10 veredas, incluyendo el casco urbano (9), y se encuentra a 2520 m.s.n.m.

Figura 9

Ubicación del Municipio de Viracachá



Nota: Se muestra la ubicación geográfica del municipio y la localización de la ladera en estudio. Adaptado de *Datos Abiertos Catastro- Subdirección de Cartografía y Geografía* [Fotografía] por (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC, 2024]).

El municipio está ubicado a 23 km de Tunja, accesible por las rutas 6009 (10.5 km) y 60BY16 (12.5 km) según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Limita con Soracá, Boyacá, Siachoque, Ciénega y Rondón. La comunidad se dedica principalmente a la agricultura y ganadería, cultivando papa, haba, maíz y frijol,(Salas, 1996).

La ladera en estudio se encuentra localizada a 2.8 km de la cabecera municipal de Viracachá por la ruta 60BY16 que comunica con el municipio de Ciénega (Anexo I), específicamente en la zona suroccidental en la vereda de Galindos. En este sector, a lo largo de aproximadamente 200 m, ocurren frecuentemente fenómenos de remoción en masa, particularmente durante temporadas lluviosas cuando las precipitaciones superan los registros históricos promedio de la zona.

Accesibilidad a Nivel Geográfico

Los datos de la tabla 4 indican que entre Viracachá y Ciénega hay 6.4 kilómetros de distancia directa. Sin embargo, un tramo crítico inestable afecta la conectividad entre ambos municipios (Cano, 2021), obligando a utilizar rutas alternas más largas.

Tabla 4

Tiempos de Traslado

Municipio	Municipio Vecino	Distancia (km) entre el municipio y su municipio vecino	Tipo de transporte Entre el municipio y el municipio vecino	Tiempo estimado del Traslado entre el municipio al municipio vecino	
				Horas	Minutos
Viracachá	Ciénega	6.4	Bus intermunicipal	0.32	19
	Ramiriquí	13.1	Bus intermunicipal	1.50	90
	Tunja	23.1	Bus intermunicipal	0.83	50

Nota: En la tabla se muestran los tiempos de traslado y la distancia desde el municipio de Viracachá hasta los municipios cercanos. Tomado de *Análisis De Situación De Salud Con El Modelo De Los Determinantes Sociales De Salud, Municipio De Viracachá Boyacá 2021* (p.19), por (Cano, 2021).

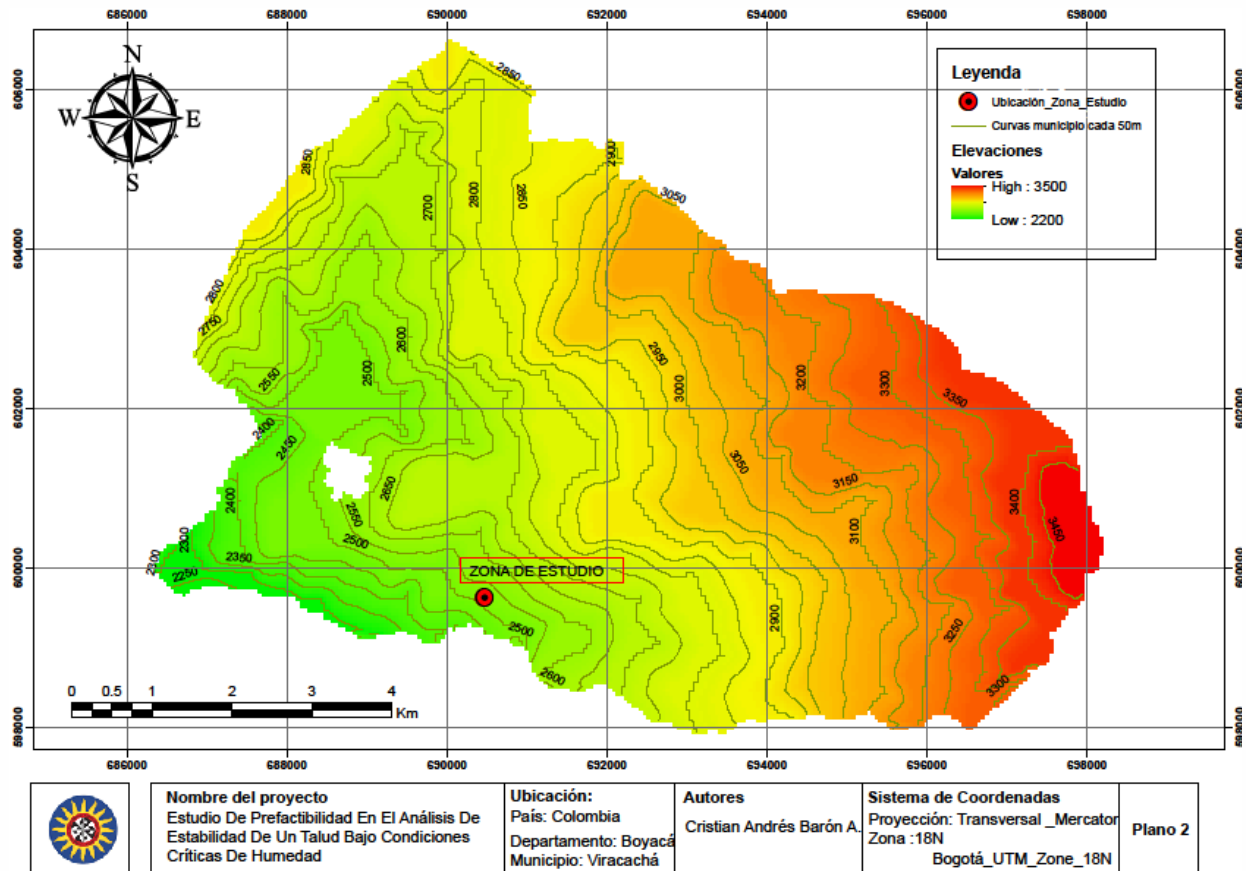
Topografía Regional y Variación de Pendientes.

Topografía Regional

El municipio de Viracachá, ubicado en la cordillera Oriental de los Andes, está caracterizado por un relieve montañoso con significativas variaciones de altitud (Figura 10). Su ubicación está determinada por variaciones significativas en altitud en toda su superficie.

Figura 10

Condiciones Topográficas del Municipio

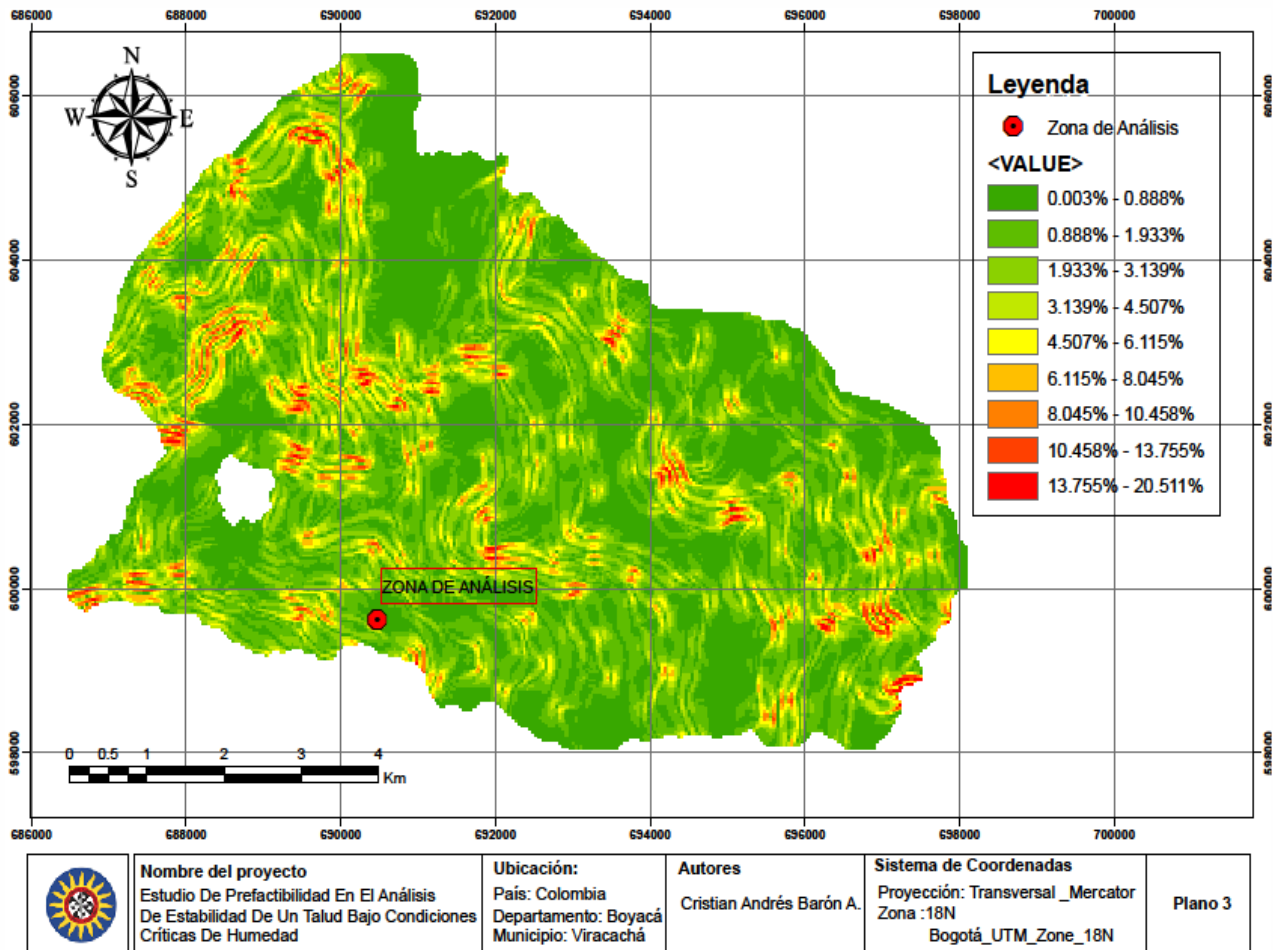


Nota: Se observa la variación en las condiciones de altura. Adaptado de *Datos Abierto Catastro-Subdirección de Cartografía y Geografía* [Fotografía] por (IGAC, 2024).

A lo largo de toda la superficie del municipio, se cuenta con pendientes en su mayoría no tan elevadas sin superar el 1.9%; en otros puntos específicos esta magnitud oscila entre el 10% y 20%, catalogando así estas zonas como puntos de alta pendiente (Figura 11).

Figura 11

Variaciones de Pendiente



Nota: La mayor parte de la superficie del municipio corresponde a bajas y medianas pendientes. Adaptado de *Datos Abierto Catastro- Subdirección de Cartografía y Geografía* [Fotografía] por (IGAC, 2024).

Condiciones Geológicas y Geomorfológicas

Geología Regional

La geología de la región está definida en la plancha N.º 191, que incluye una diversidad de afloramientos geológicos de la era cretácea, así como depósitos de coluvión y aluvión. Estas formaciones, visibles a lo largo de las carreteras que conectan Viracachá con los municipios aledaños, corresponden a una secuencia bien definida de rocas duras y blandas, con depósitos ubicados en zonas bajas, (Corpochivor, 2012).

De acuerdo con (Salas, 1996), la geología regional obedece a distintos estudios realizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Geología Estructural. A nivel estructural, respecto a la geometría y la configuración de las rocas, se encuentran una serie de fallas y pliegues característicos que presentan rumbo en dirección Este- Oeste. Se destaca la presencia de las fallas de Ramiriquí e Icarina; la primera de estas con una longitud de 1.5 km de tipo direccional y la otra con una longitud de 2.5 km de tipo direccional izquierda, deformando la formación Plaeners, (ESAP, 2000).

Según el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Viracachá, se presentan las siguientes fallas y pliegues en el municipio:

Falla Chen. Se caracteriza por poner en contacto las rocas de la formación Conejo (Kscn) con la formación Labor y Tierna en una extensión de aproximadamente 5 km. Esta falla atraviesa las veredas de Pueblo viejo y Chen en sentido Este-Oeste.

Falla Manzanos. Corresponde a la falla con mayor extensión en el municipio con 6 km y genera un sobrecorrimiento de la formación conejo con una disminución notable en el espesor.

Falla Chuscal. Falla direccional derecha que genera el desplazamiento y fracturamiento de los materiales de la formación Plaeners reflejándose un gancho que rodea el alto del pueblo (Km 7+000 desde la cabecera municipal) con una longitud de 2.5 km.

Estructuras Sinclinales: De manera particular, el sinclinal del municipio de Viracachá presenta una dirección en sentido Este- Oeste, donde el casco urbano se encuentra en el núcleo. En toda la superficie y en el sentido Norte-Este se encuentran los siguientes sinclinales: S. Ruma, S. Galindos, S. Manzanos, S. Chen.

Estructuras Anticlinales. Como consecuencia de los esfuerzos de tensión y/o compresión, se da lugar a Pliegues anticlinales con materiales plásticos, entre los que se tienen: A. Ruma, A. Chen, A. Susachín y A. Manzanos.

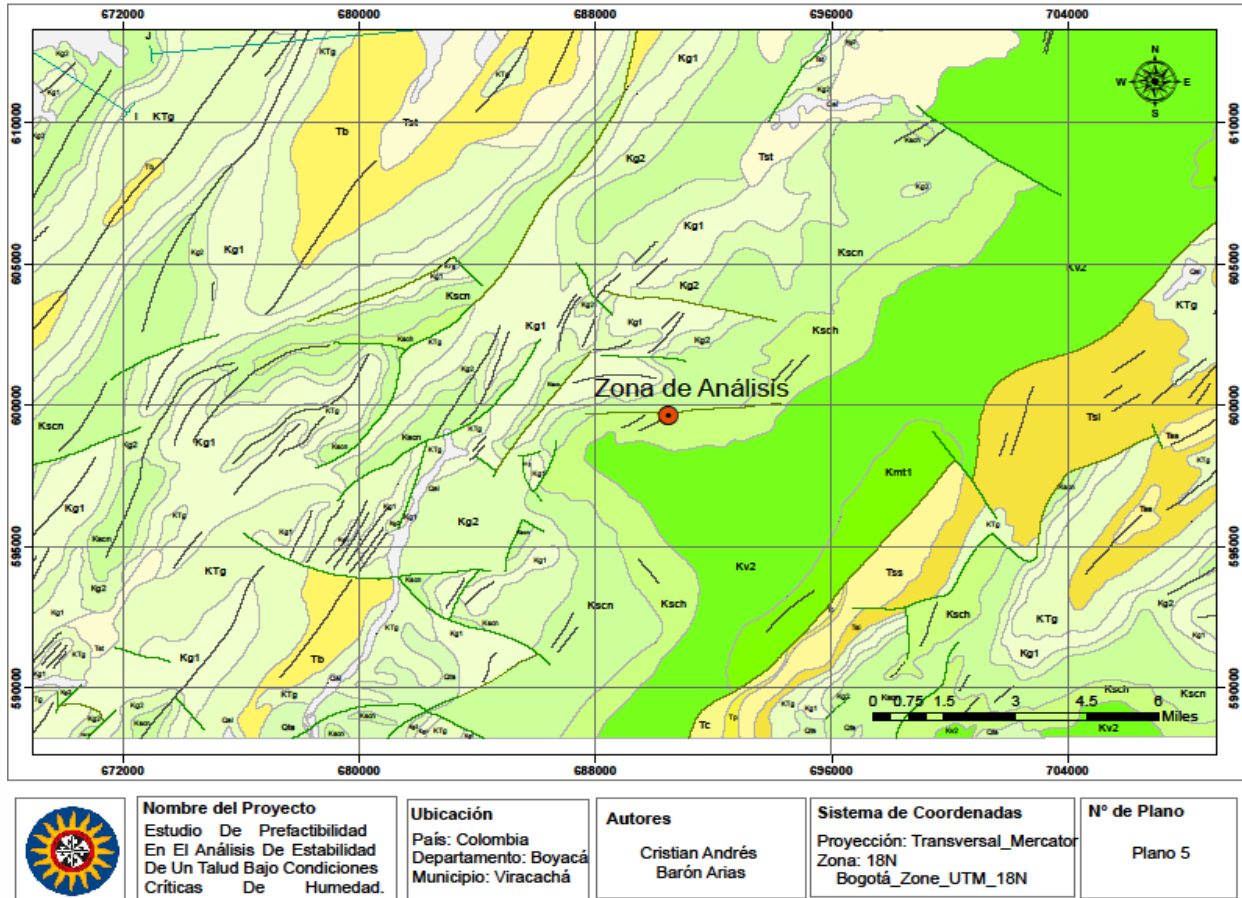
Geología Local

Según la plancha geológica N° 191 del Servicio Geológico Colombiano, el talud se ubica en una zona con una falla fotogeológica y dos formaciones geológicas: Formación Conejo (Kscn) y Grupo Churuvita (Ksch), como se ilustra en la Figura 6.

Formación Churuvita (Ksch). Según (Corpochivor, 2012), se cuenta con una secuencia de arcillolitas fisibles de color gris oscuro, intercaladas con areniscas de grano fino, calizas y limolitas silíceas, con un espesor de 475 m. Esta formación aflora al sudeste del casco urbano en las veredas de Pirguata, Galindos y Caros, específicamente en el margen izquierdo del río Viracachá continuando con el cauce de la quebrada cuarto hasta llegar al nacimiento de la quebrada Honda, donde el espesor es de 363 m.

Figura 12

Formaciones Geológicas de la Zona en Estudio



Nota: La plancha geológica muestra las formaciones en las que se encuentra el talud analizado. Adaptado de Datos Abierto Catastro- Subdirección de Cartografía y Geografía [Fotografía] por (IGAC, 2024).

El ambiente de deposición se caracteriza como marino epicontinental o de plataforma somera, evidenciado por una secuencia sedimentaria que refleja variaciones en el nivel del mar y en los aportes sedimentarios. La columna estratigráfica presenta la siguiente disposición:

Sección basal: Dominada por paquetes de areniscas bien compactadas, posiblemente cuarzoarenitas o subarcosas, indicativas de un ambiente de alta energía en la zona costera o de plataforma interna.

Sección media: Exhibe una alternancia rítmica de calizas, areniscas y arcillolitas. Esta intercalación sugiere ciclos transgresivos-regresivos de menor orden. La presencia de fósiles, presumiblemente de origen marino (se recomienda especificar los tipos), corrobora el ambiente deposicional marino. La disminución en el espesor de los estratos podría indicar una progresiva profundización de la cuenca o una reducción en la tasa de sedimentación.

Sección superior: Caracterizada por una secuencia de areniscas y calizas, culminando en el techo con shales (lutitas) negros y grises, seguidos por limolitas silíceas. Esta sucesión sugiere una transición hacia condiciones más profundas o de menor energía, posiblemente asociada a un evento transgresivo mayor.

Formación Conejo (Kscn). (Corpochivor, 2012), especifica que esta formación está constituida inicialmente por un estrato de calizas y continúa con shales negros, limolíticos y calcáreos que los subyace. Seguidamente, se presentan Shales gris oscuro y areniscas bandeadas un poco silíceas fracturadas. Continuamente se tiene la presencia de areniscas con intercalaciones de Shales negros. Esta formación aflora en la parte central abarcando las siguientes veredas: Pirguata en su parte alta, Parras, Galindos, Pueblo Viejo y el Alto de Quemba. Se genera un rumbo de las rocas de $N50^{\circ}E$ y un buzamiento de $30^{\circ}NW$, resaltándose que el espesor aproximado en este sector corresponde a 205 m y su ambiente de deposición es transicional con una edad que va desde el Coniciano Superior al Santoniano.

Geomorfología

De acuerdo con (Escuela Superior de Administración Pública [ESAP], 2000) en el municipio de Viracachá, se identifican diferentes unidades geomorfológicas (Figura 13) que presentan características específicas relacionadas con su relieve y los procesos geodinámicos.

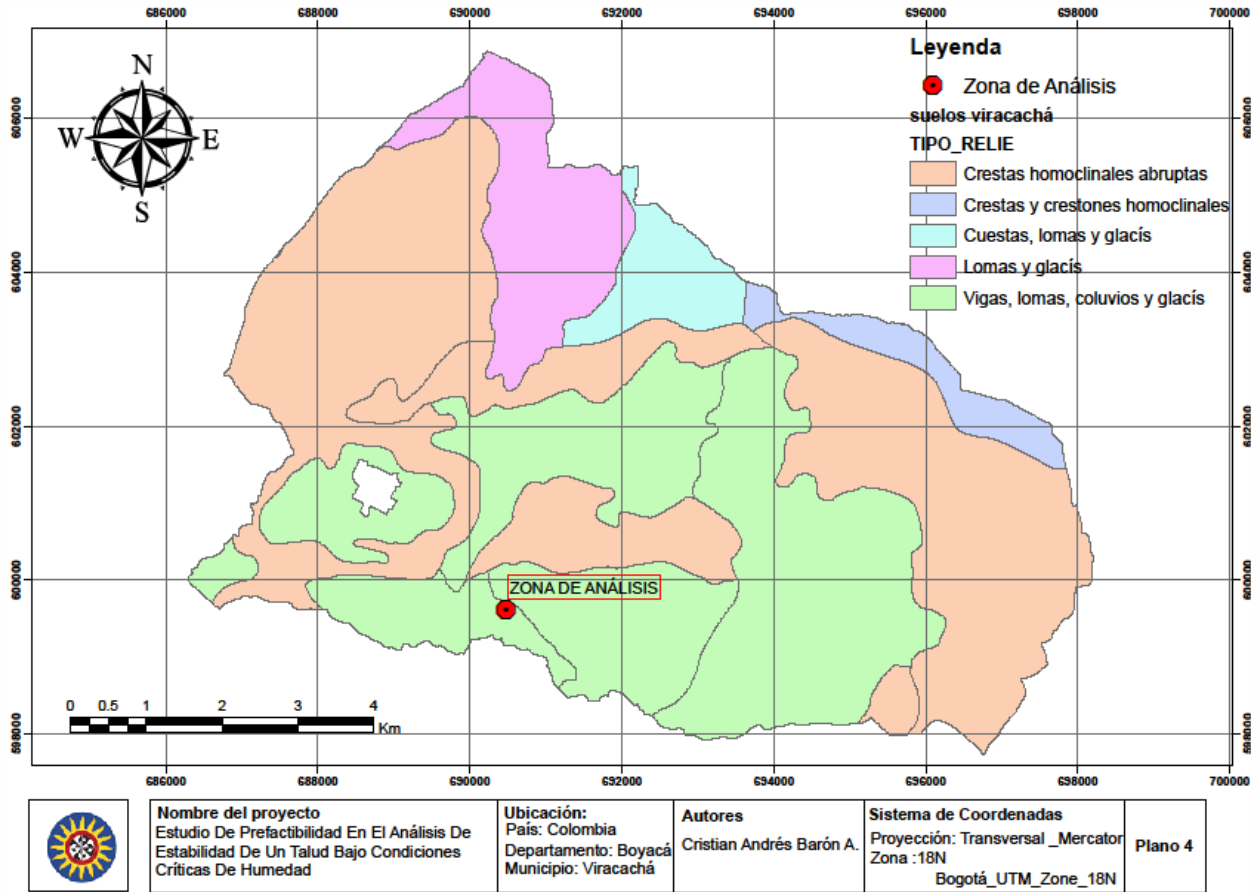
Unidad de Montaña y Colinas Estructurales. Se caracteriza por estar compuesta de laderas estructurales, crestas y cuestas. Estas primeras están formadas por materiales de las formaciones Conejo y Plaeners, que incluyen arcillolitas intercaladas con areniscas y cherts, así como niveles arcillosos. Se encuentran principalmente en la vereda de Parras y presentan inclinaciones que varían entre el 14% y el 70%.

Por otro lado, las crestas son estructuras predominantemente compuestas por areniscas y cherts de las formaciones Labor, Tierna y Plaeners, con algunos niveles arcillosos de la formación Conejo. Estas geofomas se localizan en la parte alta del pueblo, en la vereda Pueblo Viejo, así como en la parte baja de la vereda Naranjos y en la zona central de la vereda Galindos, donde las inclinaciones oscilan entre el 7 % y el 70 %, con un promedio general del 50 %.

Finalmente, las cuestas son formas de relieve constituidas por areniscas de la formación arenisca tierna, intercaladas con calcáreas de la formación Churuvita. Se localizan en gran parte de la vereda Centro, en la parte baja de la vereda Pueblo Viejo y en el sector Loma Gorda de la vereda Chen, presentando pendientes que pueden alcanzar hasta el 70%, con predominio de una inclinación ondulada (ESAP, 2000).

Figura 13

Condiciones Geomorfológicas del Municipio



Nota: Se evidencia la zonificación a nivel geomorfológico del municipio, resaltándose que la zona de estudio corresponde a lomas. Adaptado de *Datos Abierto Catastro- Subdirección de Cartografía y Geografía* [Fotografía] por (IGAC, 2024).

Formas de Origen Depositional. De acuerdo con (ESAP, 2000), estas estructuras son formas de relieve originadas por fenómenos de desgaste y acumulación de materiales, se distinguen por el tipo de transporte que afectan a los desplazamientos de los materiales durante el

proceso morfogénico. En el municipio existen dos formas de origen deposicional, que ocupan un área de aproximadamente el 10% de la superficie del municipio.

Valles Aluviales. A lo largo de su cauce, los materiales arrastrados por el río Viracachá se depositan en las riberas de acuerdo con la velocidad caudal y con la sinuosidad del río. Los cantos son de forma subredondeados y angulosos, lo que indica que los mismos se transportan en distancias cortas, pero sufren una alta erosión. Estos valles presentan formas alargadas, siendo su eje paralelo al curso del río, la forma de relieve origina pendientes levemente onduladas. En general, son materiales poco cohesivos y no consolidados.

Valles Coluviales. Son depresiones del terreno que se han formado y modelado a través de la acumulación de materiales diversos. Estos materiales provienen de las formaciones geológicas circundantes y se depositan en las zonas bajas de las laderas o al pie de las cuestas. Lo que distingue a estos valles es el mecanismo principal de transporte de estos materiales.

Una característica notable de los Valles Coluviales es la heterogeneidad de los materiales que los componen. A diferencia de otros procesos de sedimentación, como los fluviales, que tienden a clasificar los sedimentos según su granulometría, en los Valles Coluviales se pueden encontrar materiales de diversos tamaños mezclados, desde partículas finas hasta bloques de roca de gran tamaño.

La topografía resultante de esta acumulación de materiales es distintiva. Los Valles Coluviales presentan un perfil ondulado, con pendientes suaves que generalmente no superan el 14% de inclinación. Esta configuración del terreno crea un paisaje de colinas bajas y ondulaciones, contrastando con las pendientes más pronunciadas de las laderas circundantes.

La presencia y distribución de estos Valles Coluviales no solo es importante desde el punto de vista geomorfológico, sino que también presenta implicaciones prácticas para el uso del suelo, la planificación urbana y la evaluación de riesgos geológicos en la región.

Vertientes Escarpadas Irregulares El municipio de Viracachá presenta un terreno accidentado y rugoso, cuya formación se debe a procesos geológicos como elevaciones del terreno, inclinaciones y desgaste natural. Este tipo de relieve se puede observar especialmente a lo largo de la quebrada Honda, específicamente en las veredas de Pueblo Viejo y Chen. También se extiende hacia las zonas de altura, abarcando las áreas de páramo que se encuentran en las veredas de Caros y la Isla, (Salas, 1996).

Hidrografía

Viracachá se destaca por sus abundantes fuentes de agua que se manifiestan en diversas quebradas a lo largo de su superficie (Figura 14). A nivel hidrográfico, el municipio se encuentra subdividido por dos cuencas principales, la cuenca del río Viracachá y la cuenca Quebrada Manzanos, formadas por las características topográficas y climáticas de la región.

La zona de estudio se encuentra localizada dentro de la cuenca del río Viracachá, esta a su vez se encuentra subdividida por dos subcuencas denominadas como: Subcuenca Quebrada La Isla y Subcuenca del Río Juyasia.

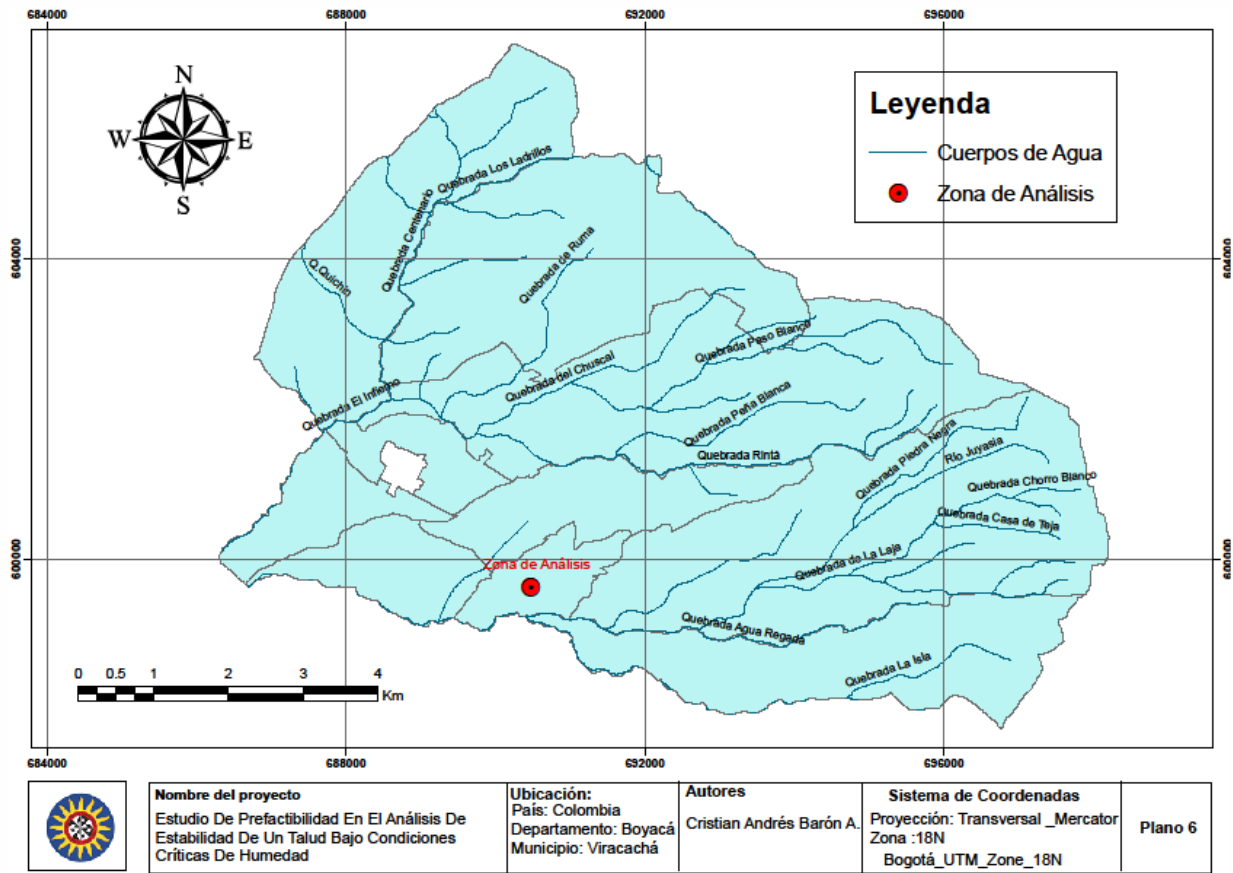
Subcuenca de la Quebrada La Isla.

La subcuenca con dirección Este a Oeste atraviesa las veredas de Galindos y Pirguata al sur de Viracachá, Boyacá, cerca de Ciénega. Comprende un área de 28.069 km² y un perímetro de 15.940 m. La quebrada la Isla alcanza una altura de 3.400 m.s.n.m, con 6.875 m de longitud y siete

grados de pendiente, destacándose un depósito aluvial en su parte media que distribuye material a ambos lados del cuerpo de agua.

Figura 14

Cuerpos de Agua Municipio Viracachá



Nota: Los cuerpos de agua más cercanos al talud en estudio, no presentan mayor influencia, por consiguiente, no afectan la estabilidad del mismo. Adaptado de *Datos Abierto Catastro- Subdirección de Cartografía y Geografía* [Fotografía] por (IGAC, 2024).

Subcuenca del Río Juyasia.

La subcuenca tiene una extensión de 21.445,27 km², con su punto más alto a 3400 m.s.n.m en zona de páramo. El río Juyasia recorre pendientes moderadas (2-27%) y durante lluvias intensas forma depósitos aluviales en zonas planas. Geológicamente, el sector presenta Acuíferos tanto en la formación Churuvita, debido a su consolidación, como en la formación Conejo, caracterizada por su textura predominantemente plástica.

Dentro de esta subcuenca, según el orden jerárquico de los cuerpos de agua, existen diversas quebradas que confluyen para formar el río Juyasia. Sin embargo, estas fuentes hídricas no ejercen mayor influencia ni generan aporte sobre la zona de estudio, ya que se encuentran a una distancia aproximada de 385 metros del talud analizado.

Clima

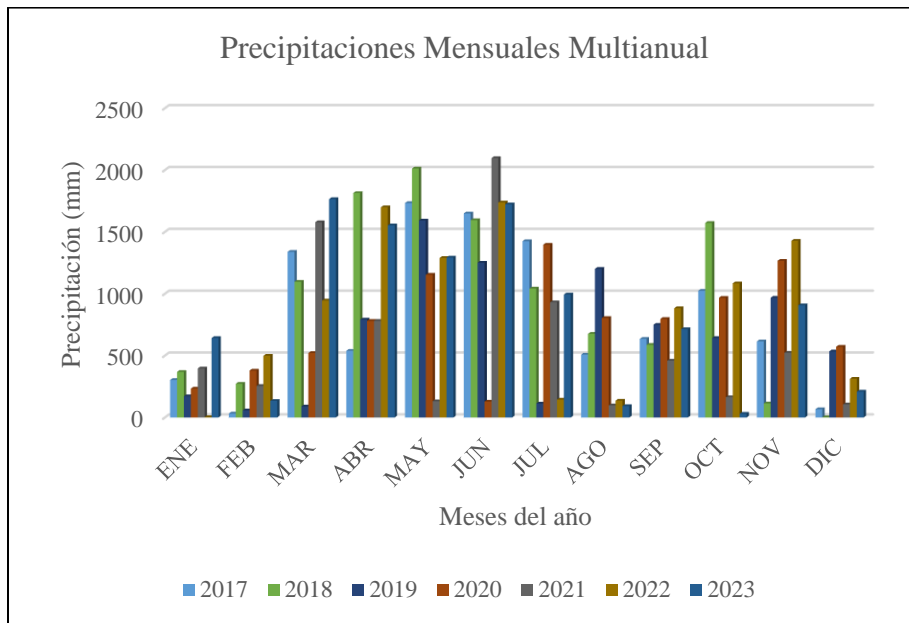
El clima es una variable clave en la comprensión de los fenómenos naturales, especialmente por su influencia directa en la dinámica del suelo. En el caso del municipio de Viracachá, con base a su ubicación geográfica y altitud, hacen que pertenezca al piso térmico frío montano bajo, con temperaturas que fluctúan entre los 10°C y 15.5°C, lo que corresponde con un clima templado-frío típico de la región.

La dirección de los vientos en este municipio se encuentra dentro de rangos moderados, con velocidades que oscilan entre 4.9 km/h y 8.5 km/h, influenciados tanto por la topografía montañosa como por las corrientes atmosféricas de la región andina. La humedad máxima anual alcanza el 91%, observada durante los meses de junio y julio, lo que coincide con la temporada

más lluviosa en el área de influencia (Figura 1515), caracterizada por lluvias orográficas y una mayor nubosidad.

Figura 15

Precipitaciones Mensuales del Área de Influencia



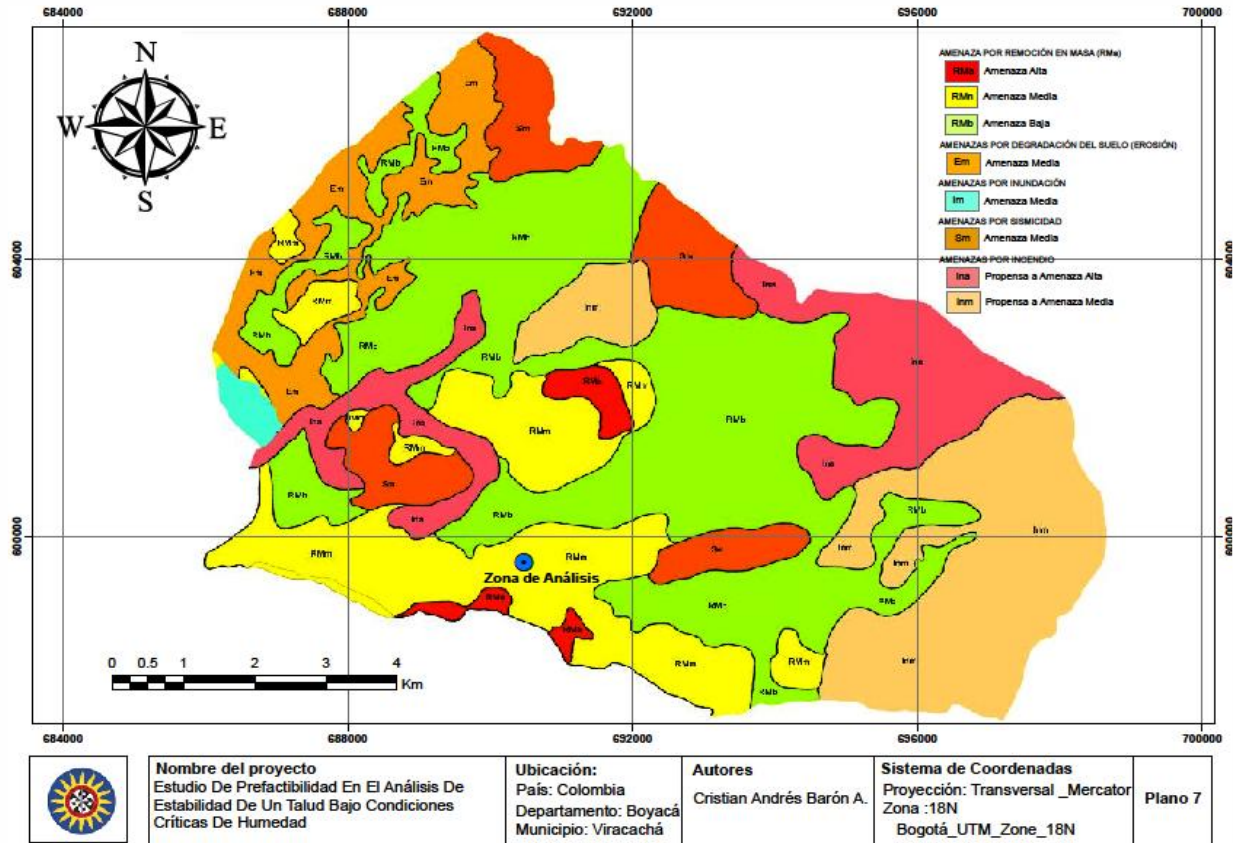
Nota: En la gráfica, se observa los rangos de tiempo en los que se presentan más milímetros de precipitación al año. Adaptado de *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos* [Fotografía] por (IDEAM, 2024).

Amenazas

En toda la superficie del municipio de Viracachá, Boyacá, y teniendo en cuenta el Esquema de Ordenamiento Territorial constituido mediante el Acuerdo N° 008 del 09 de julio de 2000, se presentan diferentes tipos de amenazas naturales (Figura 1616).

Figura 16

Zonificación de Amenazas en el Municipio



Nota: La figura muestra las distribuciones en área que se tiene para las diferentes zonas sísmicas. Tomado de *Análisis De Situación De Salud Con El Modelo De Los Determinantes Sociales De Salud*, Municipio De Viracachá, Boyacá 2021 (p.19), por (Cano, 2021).

La evaluación de amenazas es crucial para la toma de decisiones en desarrollo urbano, rural e infraestructura. Es fundamental considerar los factores de riesgo para garantizar la seguridad de los habitantes y la sostenibilidad de los recursos naturales del municipio.

Estudio Topográfico y Geotécnico del Talud

Análisis de Precipitación

La estabilidad del talud depende de los regímenes de precipitación, con condiciones favorables durante períodos de baja pluviosidad. Se utilizó el método de polígonos de Thiessen para caracterizar espacialmente la distribución de precipitaciones, usando registros multianuales de estaciones pluviométricas circundantes (Tabla 5). Este análisis permite establecer umbrales críticos de precipitación que, incorporados en la modelación numérica, proporcionan una aproximación más realista de las condiciones que gobiernan la estabilidad del talud y facilitan el diseño de medidas de estabilización.

Tabla 5

Estaciones Climatológicas

N°	Nombre Estación	Código Estación	Coordenadas	
			ESTE (m)	NORTE (m)
1	RONDON	35085020	699057.00	592574.00
2	RAMIRIQUI - AUT	35070580	684706.00	597080.00
3	SIACHOQUE	24037550	693751.76	608891.67
4	PILA LA FINCA	24030420	687135.58	610290.44
5	VILLA LUISA	35075030	682877.00	599585.00

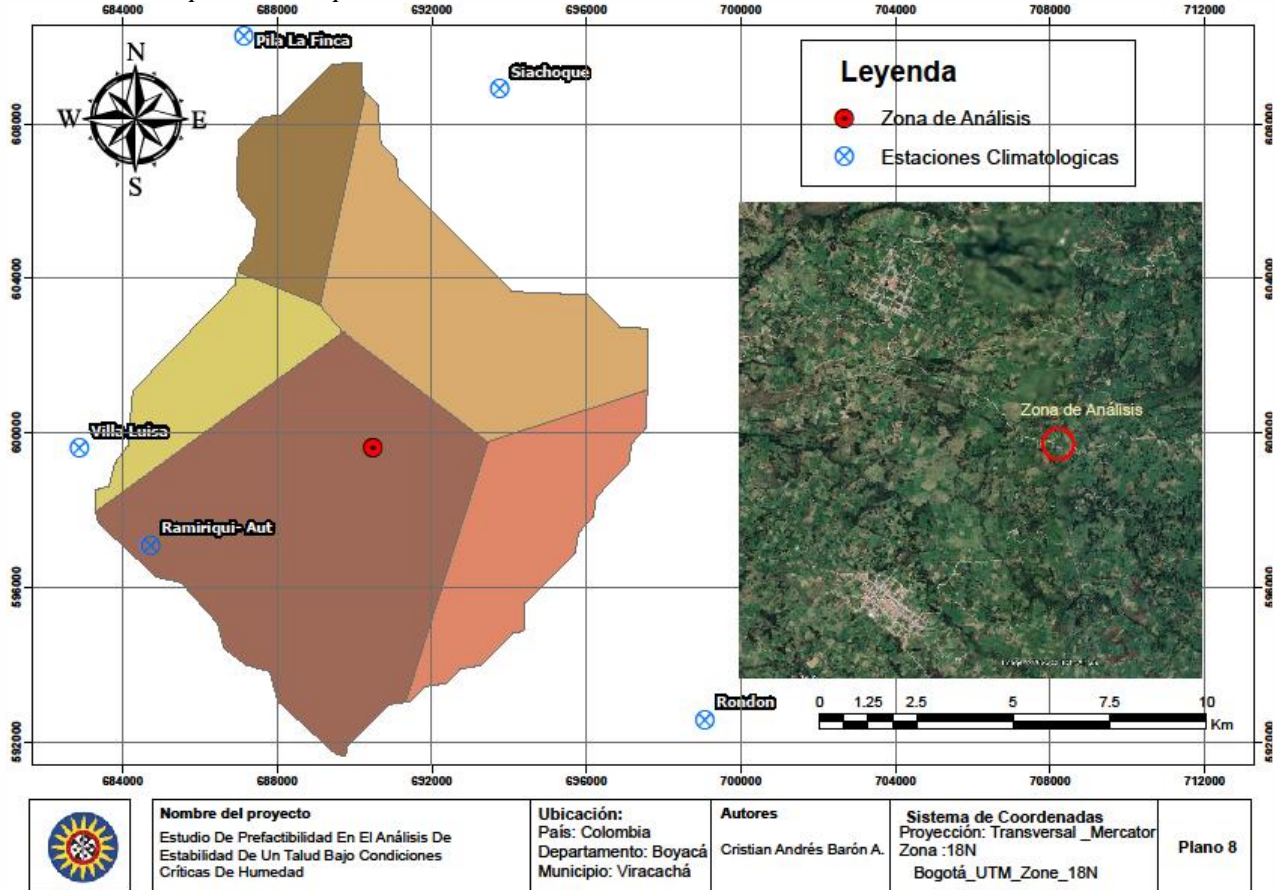
Nota: En la tabla se muestran las estaciones climatológicas utilizadas para el análisis hidrológico.

Precipitación Media- Método Polígonos de Thiessen

Con los datos históricos de los últimos 10 años (Anexo I) correspondientes a las estaciones climatológicas más cercanas al sector y con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como se ilustra en la figura 18, se logró realizar el análisis para determinar que la precipitación media anual corresponde a 9,280.75 mm (tabla 6).

Figura 17

Distribución Espacial Precipitación



Nota: Para la cuenca se muestra la distribución espacial de las precipitaciones de acuerdo a un conjunto de datos registrados por estaciones cercanas. Adaptado de *Datos Abierto Catastro- Subdirección de Cartografía y Geografía* [Fotografía] por (IGAC, 2024).

La ecuación que permitió encontrar la magnitud de la precipitación estimada, se expresa como:

$$P_{media} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * A_i}{\sum A_i} \text{ Ec. 3}$$

El valor encontrado mediante esta metodología, estuvo de acuerdo a los registros de los últimos diez años (2013-2023), en las estaciones más cercanas al talud en estudio (Anexo I), encontrándose que esta magnitud es coherente según las áreas aferentes. Esta información hidrológica constituye un insumo fundamental para comprender las condiciones de humedad que pueden afectar la estabilidad del talud, especialmente en periodos de alta precipitación donde la saturación del suelo podría comprometer sus propiedades geomecánicas.

Tabla 6

Cálculo de Precipitación Media

N°	Nombre Estación	Código Estación	Coordenadas		Precipitación Promedio Multianual (mm)	Área (Ha)	Área* Precipitación
			Este	Norte			
1	RONDON	35085020	699057.00	592574.00	18033.6	2021.1	36448210.7
2	RAMIRIQUI - AUT	35070580	684706.00	597080.00	9331.5	5967.3	55683385.0
3	SIACHOQUE	24037550	693751.76	608891.67	5935.4	3233.8	19193533.8
4	PILA LA FINCA	24030420	687135.58	610290.44	4903.0	1320.7	6475522.3
5	VILLA LUISA	35075030	682877.00	599585.00	8266.0	1373.7	11354770.3
TOTAL						13916.6	129155422.0
PRECIPITACIÓN PROMEDIO MULTIANUAL						9280.70 mm/año	
(mm/año)							

Nota: En las estaciones climatológicas utilizadas en el método de Thiessen, se evidencia una variación significativa en cuanto a las magnitudes registradas.

Exploración Geotécnica

En esta etapa resulta crucial recuperar tanto muestras alteradas como inalteradas de cada uno de los estratos con el fin de identificar las características y propiedades, determinadas a través de inspección en campo o análisis de laboratorio, de las áreas donde ocurren procesos de remoción en masa o el desplazamiento de los materiales.

La extracción de muestras fue ejecutada de forma semi-mecánica con muestreador tipo shelby y cuchara partida, ejecutándose dos sondeos: uno en la pata y otro en el cuerpo del talud. Las profundidades correspondieron a 4.60 m y 8.60 m respectivamente; dichas magnitudes dependieron de la localización de la superficie de falla y de la ubicación del nivel freático.

Figura 18

Ejecución Sondeo 1



Nota: En el cuerpo del talud se efectuó un sondeo 1 donde se lograron identificar los cambios de estrato y la profundidad a la cual se está produciendo el deslizamiento.

- (a) En esta figura se muestra la ejecución del Sondeo 1 en el talud en estudio, llevado a cabo mediante equipo de perforación semi- mecánica
- (b) Se puede evidenciar el cambio en las propiedades físicas del material, como su textura, color, consistencia y grado de compactación, lo que indica una posible transición entre diferentes estratos.

Figura 19

Perfil Sondeo 1



Nota: El perfil encontrado en campo para la identificación de la superficie de falla.

- (a) Se muestra la profundidad que se tenía de material orgánico o capa vegetal.
- (b) Se evidencian muestras alteradas que facilitaron la construcción del perfil del suelo in situ, con el objetivo de identificar la zona de falla. El material identificado hasta los 3.40 m corresponde a arenas arcillosas con un color marrón y una consistencia blanda.

Figura 20

Ejecución Sondeo 2



Nota: En el pie del talud se efectuó un sondeo 2 donde se lograron identificar los cambios de estrato y la profundidad a la cual se está produciendo el deslizamiento.

(a) La figura muestra la ejecución del sondeo 2, llevado a cabo en el cuerpo del talud.

(b) Se muestra la recuperación de muestras alteradas para la construcción del perfil in situ.

La recuperación de las muestras se llevó a cabo de tal manera que se lograra reconstruir el perfil del subsuelo (Figura 21), permitiendo identificar de la misma manera la profundidad a la cual se está deslizando el material.

Figura 21

Perfil Sondeo 2



Nota: En la ejecución del sondeo 2, se evidencio caracteristicamente un material con una unica tonalidad.

- (a) La ilustración muestra el perfil del sondeo 2 donde se evidencio tonalidad oscura característica de las condiciones geológicas del sector.
- (b) A una profundidad de 5.50 m se tienen unas propiedades físicas (color, textura, consistencia, etc) similares a las encontradas desde el inicio de la exploración.

A lo largo de los 13.20 m de exploración se realizaron los siguientes ensayos: Límites de Atterberg, Granulometría, Gravedad Específica, Hidrometría, Corte Directo, Humedades y Pesos unitarios; cada uno de estos cumpliendo con lo especificado en las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) (Tabla 7).

Tabla 7

Cantidad de Ensayos de Laboratorio

ENSAYOS DE LABORATORIO		
Número	Sondeo	
	1	2
Coordenadas	Longitud: W73° 16' 50.17" Latitud: N5° 25' 21.90"	Longitud: W73° 16'51.06" Latitud: N5° 25' 20.58"
Profundidad (m)	4.60	8.60
Humedad Natural	8	16
Límites de Atterberg	2	4
Granulometría	2	5
Hidrometría	2	1
Gravedad Especifica	2	1
Corte Directo	1	4
Pesos unitarios	1	4
Triaxial	0	1

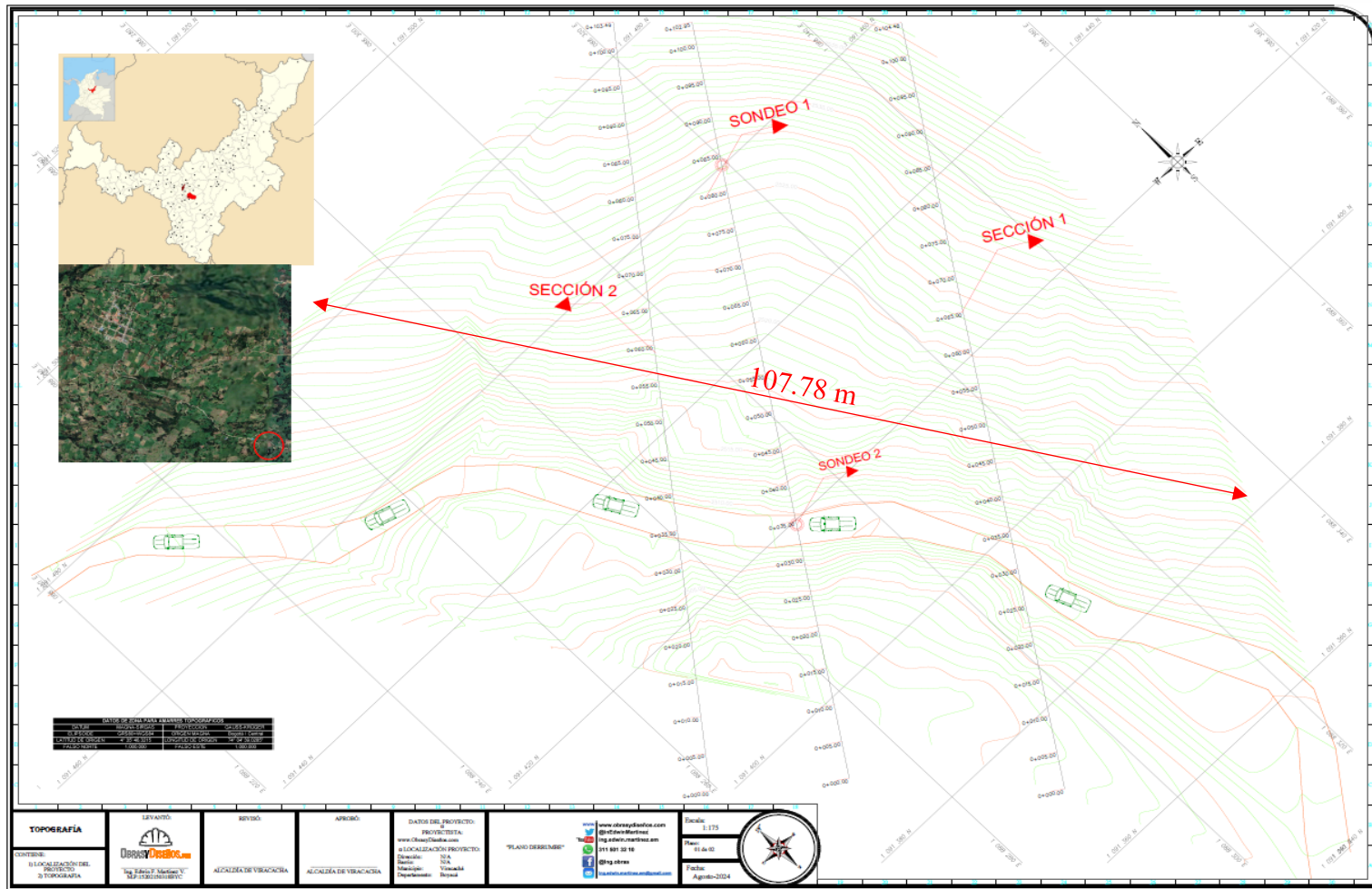
Nota: Los ensayos permiten identificar con mayor claridad las condiciones del suelo a lo largo de la profundidad.

Topografía Local y Secciones de Análisis

Se realizó un levantamiento planimétrico completo del área de estudio, que permitió caracterizar detalladamente la geometría del terreno y cada una de las partes del deslizamiento. A partir de estos datos topográficos, se identificaron las zonas dentro del talud con mayor pendiente, las cuales son más susceptibles a sufrir deslizamientos, y se generaron las secciones transversales necesarias para la posterior construcción de los perfiles geotécnicos y el análisis numérico (Figura 22).

Figura 22

Planimetría del Talud



Nota: En la imagen se observa el levantamiento planimetrico mediante el cual se logro la construcción de las secciones.

Ensayos de Laboratorio

Ensayo Límites de Atterberg

La ejecución de ensayos de límites de consistencia desempeña un papel crucial en la caracterización geotécnica del talud en estudio; ya que permiten cuantificar las variaciones en la consistencia en función de la profundidad y la estratigrafía del terreno. Los ensayos se realizaron sobre muestras alteradas obtenidas mediante la exploración de campo, siguiéndose lo establecido en las normas del Instituto Nacional de Vías (INV E 125 para límite líquido, INV E 126 para límite plástico e INV E 127 para índice de plasticidad).

Figura 23

Ensayo de Límites de Consistencia



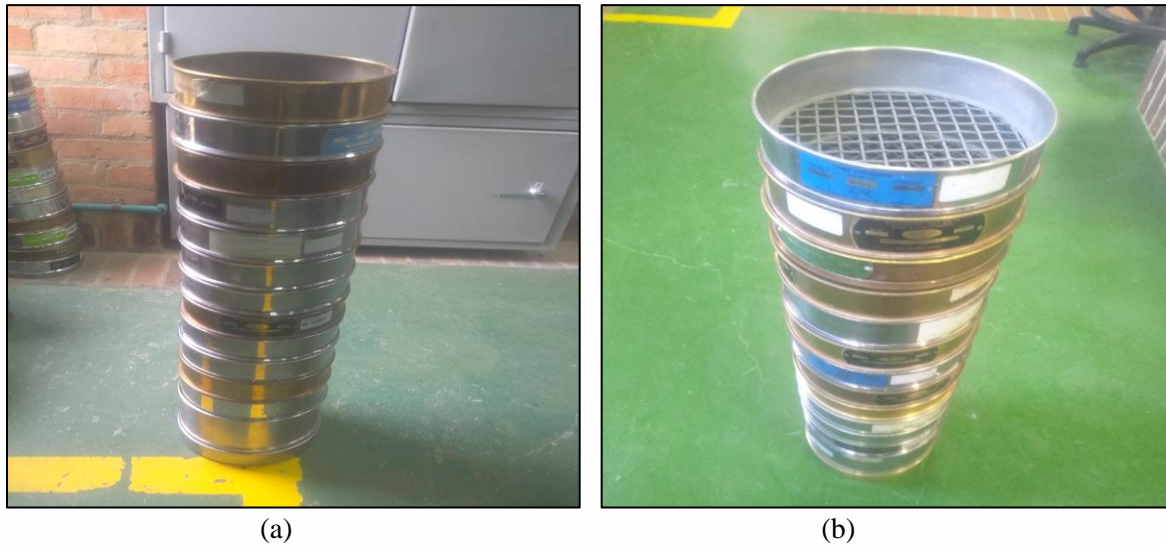
Nota: Los ensayos de límites de consistencia fueron ejecutados en ambos sondeos a diferentes niveles. En el sondeo 1 se realizaron análisis a 1.8 m y 4.2 m de profundidad, mientras que en el sondeo 2 se efectuaron mediciones a 2.3 m, 4 m, 5.5 m y 6.5 m. La selección de estos intervalos permite evaluar cómo varía la consistencia del suelo conforme aumenta la profundidad de exploración.

Ensayo de Granulometría

Se ejecutaron ensayos de caracterización física del material mediante análisis granulométrico por tamizado (Figura 24 a y 24 b), siguiendo los lineamientos establecidos en la norma INV E-123. El propósito es determinar la distribución de los tamaños de las partículas presentes en el suelo, los resultados son mostrados en el Anexo II. Sin embargo, previo a la ejecución de este ensayo, se llevó a cabo el lavado sobre el tamiz N°200, con base a la norma INV E 214 para determinar con precisión el contenido de finos (limos y arcillas) presentes en la muestra.

Figura 24

Tamices para el Ensayo de Granulometría



Nota: La figura muestra la serie de tamices utilizados para determinar el tamaño de las partículas de suelo.

Esta caracterización identificó los porcentajes de gravas, arenas y finos (limos y arcillas), información esencial para comprender el comportamiento mecánico del suelo y clasificarlo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Para caracterizar integralmente la distribución de partículas finas (menores al tamiz No. 200), se realizó el ensayo de hidrometría según la norma INV E-124. Este método, basado en la ley de Stokes y la sedimentación en medio acuoso, determinó los porcentajes de fracciones de limos y arcillas (partículas menores a 0.075 mm).

Figura 25

Ensayo de Hidrometría



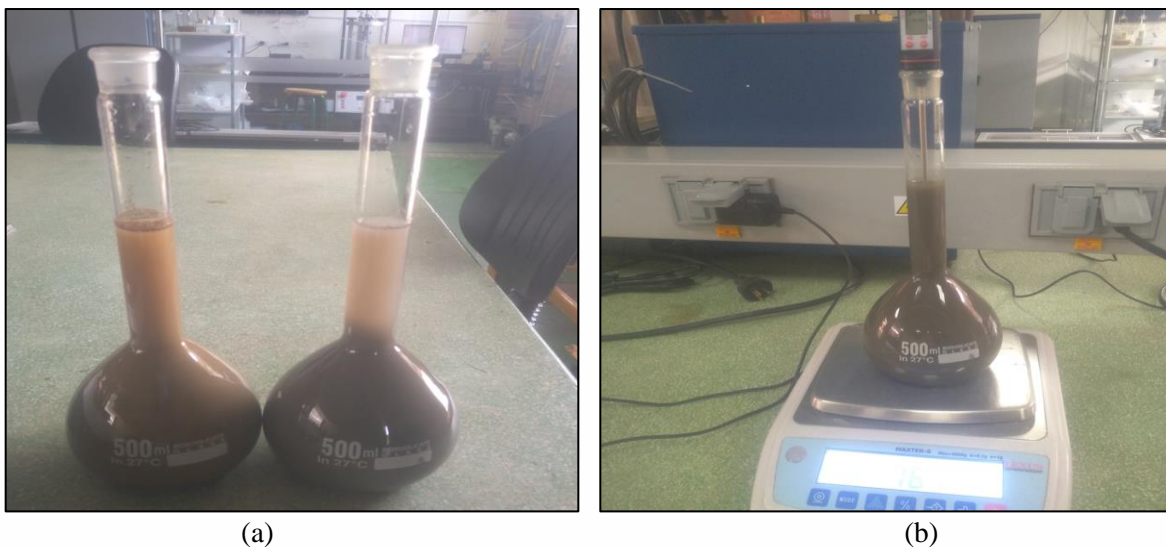
Nota: La figura muestra la ejecución del ensayo de hidrometría para 3 de las muestras alteradas, extraídas de la exploración geotécnica.

- (a) Se presenta la ejecución del ensayo correspondiente al estrato 2 del sondeo 1.
- (b) Se muestran los 3 ensayos de hidrometría realizados

Como componente fundamental de la caracterización geotécnica del talud investigado, se determinó la gravedad específica de los sólidos (G_s) en muestras extraídas de los dos sondeos, mediante el procedimiento experimental establecido en la norma INVE 128. Este parámetro físico, definido como la relación entre la densidad de las partículas minerales constituyentes del suelo y la densidad del agua destilada a 20°C, resulta imprescindible para la cuantificación de las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo.

Figura 26

Muestras para el Ensayo de Gravedad Específica



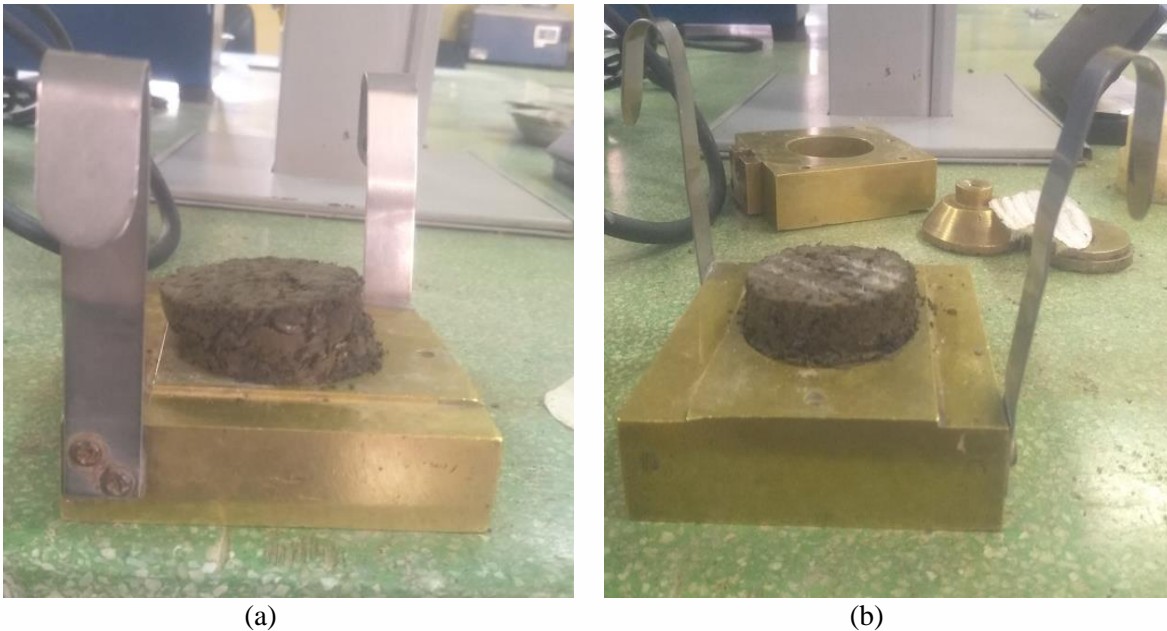
Nota: El ensayo de gravedad específica se realizó para cada uno de los estratos identificados mediante la exploración geotécnica.

Se ejecutaron ensayos de corte directo según lo dispuesto en la norma INV E 154 para las muestras provenientes de los sondeos 1 y 2. Para algunos especímenes fue necesaria la reconstitución del material debido a que no se contaba con material totalmente homogéneo,

mientras que otros se ejecutaron en estado inalterado. Las pruebas, realizadas bajo condición consolidada no drenada (Cu) y sometidas a tres esfuerzos normales distintos, permitieron determinar el ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (c) del suelo.

Figura 27

Muestras Resultantes de Ensayo de Corte Directo



Nota: En esta imagen se muestran los ensayos de corte para las muestras de suelo extraídas en la exploración geotécnica.

(a) y (b) evidencian el estado de las muestras de suelo luego de ser sometidas al ensayo de Corte Directo.

Para el material analizado, se determinó la cohesión en condiciones no drenadas, lo cual responde a dos factores determinantes en el comportamiento geomecánico del suelo. Por un lado, la velocidad de aplicación de carga durante el ensayo no permitió el drenaje adecuado del agua

intersticial. Por otro lado, la clasificación granulométrica del suelo reveló un contenido significativo de material fino (limos y arcillas), cuya baja permeabilidad natural restringe el flujo de agua

En este caso particular no se llevo a cabo ensayo de penetración estandar (SPT) que permitiera hallar la densidad relativa del suelo, sino que únicamente se implemento el muestreador tipo cuchara partida, para la extracción de muestras alteradas que permitieran la reconstrucción del perfil en campo.

Resultados de laboratorio

En el sector conocido como Puerto Genaro se realizó un análisis geotécnico de un talud afectado por deslizamiento. Mediante ensayos de laboratorio, se estudiaron las propiedades del suelo para entender las causas del deslizamiento y proponer soluciones de estabilización. Los resultados permitieron comprender cómo el agua afecta la estabilidad del talud y desarrollar soluciones con una relación costo/ beneficio adecuadas.

Sondeo 1

Estratigrafía y Clasificación del Suelo. El análisis estratigráfico del sondeo 1 revela una predominancia de Arenas Arcillosas (SC), según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). La columna estratigráfica exhibe las siguientes características:

- Material predominante: Arenas Arcillosas (SC)
- Coloración: Tonalidad marrón hasta una profundidad de 3.40 m y hasta los 4.60 m se tiene una tonalidad gris oscura.

- Nivel freático: Localizado a 3 m de profundidad

Humedad. El perfil de humedad del sondeo 1 arrojó los siguientes resultados:

- Rango de humedad: 11% - 20.7%.
- Condición crítica: 20.7% a 4.5 m de profundidad.

Nota: Esta distribución de humedad es crucial para la identificación y evaluación de la potencial superficie de falla.

Límites de Consistencia. En relación con los ensayos de caracterización de la fracción fina presente en el suelo, se realizaron pruebas de Límites de Consistencia a profundidades de 1.8 m y 4.2 m. Los resultados obtenidos para el Límite Líquido (LL) mostraron valores en un rango comprendido entre 25.3% y 26.6%, mientras que el Límite Plástico (LP) presentó valores de 17.98% y 17.65% a las mismas profundidades. Estas magnitudes permiten identificar el comportamiento del suelo en función de su contenido de humedad, evidenciando una variabilidad en su plasticidad y su capacidad para deformarse en estado plástico.

Parámetros de Resistencia al Corte. Los ensayos de corte directo arrojaron una magnitud para la muestra analizada:

Cohesión no Drenada (Cu)

- A 1.8 m de profundidad: 0.65 kg/cm².

Angulo de Fricción

- A 1.8 m de profundidad: 44.3°.

Pesos Unitarios. Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados a las muestras extraídas del sondeo 1, se determinaron las propiedades físicas del

material, donde se evidenció que el peso unitario húmedo presenta un valor de $20,66 \text{ kN/m}^3$, mientras que el peso unitario seco es de 18.8 kN/m^3 .

Granulometría. Se analizó la distribución granulométrica de los estratos. El estrato uno presentó 24.6% de gravas, 75.4% de arenas y 0.06% de finos. Por su parte, el estrato dos mostró 13% de gravas, 86.8% de arenas y 0.22% de finos. Cabe destacar que estos porcentajes de distribución corresponden al material después de realizado el proceso de lavado de las muestras.

Proyecto	Estudio de Suelos Viracachá	Coordenadas	Fecha
Localización	Puerto Genaro	Longitud: W73° 16' 50.17"	15/07/2024
Nombre	Cristian Andrés Barón Arias	Latitud: N5° 25' 21.90"	SONDEO
Elevación: 2526 m.s.n.m			1

Profundidad (m)	Litología	Descripción Suelo	Clasificación SUCS	Muestra Alterada	Muestra inalterada	wn (%)	LL (%)	LP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	γ_{total} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Gravedad Especifica	Cu (kg/cm ²)	ϕ	
0,0		Capa Vegetal															
0,9		Arena Arcillosa	SC	1		12,8								2,5			
1,5																	
1,8				2		11,1	25,3	17,98					20,66	18,8		0,65	44,3
2,0																	
2,5																	
2,8				3		12,4			24,6	75,4	0,06						
3,0				4		15,7	NIVEL FREATICO										
3,4																	
3,5				5		10,5											
4,0		Arena Arcillosa	SC	6		9,5			13,0	86,8	0,22			2,7			
4,5								26,6	17,65								
4,6				7		20,7											
				8		11,9											

Sondeo 2

Estratigrafía y Clasificación del Suelo. El análisis estratigráfico del sondeo 2 revela una predominancia de Arenas Arcillosas (SC), según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). La columna estratigráfica exhibe las siguientes características:

- Material predominante: Arenas Arcillosas (SC)
- Coloración: Tonalidad oscura uniforme a lo largo de la exploración
- Nivel freático: Localizado a 6.20 m de profundidad

Humedad. El perfil de humedad del sondeo presenta los siguientes resultados:

- Rango de humedad: 9.3% - 27%.
- Condición crítica: 27% a 7.4 m de profundidad.

Nota: Esta distribución de humedad es crucial para la identificación y evaluación de la potencial superficie de falla.

Límites de Consistencia. En relación con los ensayos de caracterización de la fracción fina presente en el suelo, se realizaron pruebas de Límites de Consistencia a profundidades de 2.3 m, 4 m, 5.5 m y 6 m. Los resultados obtenidos para el Límite Líquido (LL) mostraron valores en un rango comprendido entre 26.01% y 36.55%, mientras que el Límite Plástico (LP) presentó valores que oscilaron entre 19.54% y 23.14%. Estas magnitudes permiten identificar el comportamiento del suelo en función de su contenido de humedad, evidenciando una variabilidad en su plasticidad y su capacidad para deformarse en estado plástico.

Parámetros de Resistencia al Corte. Los ensayos de corte directo arrojaron una variación significativa en los parámetros de resistencia con respecto a la profundidad:

Cohesión no Drenada (Cu)

- A 2.3 m de profundidad: 1.63 kg/cm²
- A 6.6 m de profundidad: 0.6 kg/cm²

Angulo de Fricción

- A 2.3 m de profundidad: 37°
- A 6.6 m de profundidad: 20°

Pesos Unitarios. Los resultados para esta propiedad del suelo, presentaron variaciones respecto a la profundidad. En cuanto al peso unitario seco, las magnitudes oscilaron entre 17.9 kN/m³ y 18.6 kN/m³, mientras que para el peso unitario húmedo dichos valores están dentro del rango de 20.3 kN/m³ y 21.0 kN/m³.

Granulometría. Se realizó el análisis de distribución granulométrica de los materiales encontrados a diferentes profundidades. A 2.3 m se obtuvo 13.3% de gravas, 86.2% de arenas y 0.53% de finos. A 4 m de profundidad se encontró 13.6% de gravas, 85.2% de arenas y 1.19% de finos. Finalmente, a 5 m de profundidad se identificó 11.3% de gravas, 87.8% de arenas y 0.94% de finos. Todos estos resultados corresponden a las muestras después del proceso de lavado.

Proyecto		Estudio de Suelos Viracachá		Coordenadas		Fecha													
Localización		Puerto Genaro		Longitud: W73° 16'51.06"		22/07/2024													
Nombre		Cristian Andrés Barón Arias		Latitud: N5° 25' 20.58"		SONDEO 2													
Elevación: 2520 m.s.n.m.																			
Profundidad (m)	Litología	Descripción Suelo	Clasificación	Muestra Alterada	Muestra inalterada	wn (%)	LL (%)	LP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	γ_{total} (kN/m ³)	γ_{seco} (kN/m ³)	Gravedad Especifica	Cu (kg/cm ²)	Φ (°)			
0.0		Relleno	Sin																
0.5																			
1.0				1	9.3			13.5	86.1	0.43									
1.5		Arena Arcillosa	SC																
1.7				2	11.0														
2.0																			
2.3				3	10.4	32.9	23.1	13.3	86.2	0.53	20.8	18.6				1.6	36.9		
2.5																			
2.7				4	12.5														
3.0																			
3.5																			
4.0																			
				5	13.5														
				6	10.6	26.0	19.5	13.6	85.2	1.19									

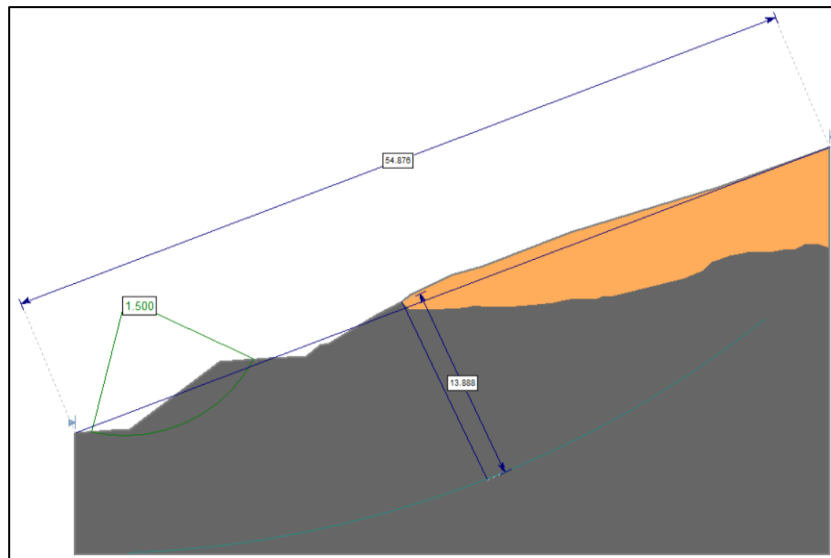
Cálculo del Volumen del Deslizamiento

Con base en las variables geométricas, se realizó el cálculo del volumen total desplazado (Ecuación 2). Estas magnitudes permitieron establecer con claridad la proporción de material que experimentó el proceso de remoción en masa (Figura 28).

La superficie de falla se identificó durante la ejecución de los sondeos, específicamente cuando se detectaron niveles de humedad extremadamente altos en comparación con los registrados a otras profundidades. Esta condición de humedad excesiva, junto con el análisis de los perfiles topográficos, permitió determinar la geometría del plano de falla.

Figura 28

Cálculo del Volumen de Deslizamiento



Nota: Para el respectivo calculo se implementó un factor de expansión de 1.275. Perfil geotécnico del Talud

[Imagen generada con AutoCAD]

$$Vol_{des} = \left(\frac{1}{6} \pi (13.88m) * 54.876m * 107.78 m \right) * 1.275 = 54,805 m^3$$

Resultados de la Investigación Experimental

La correlación entre los parámetros geotécnicos obtenidos en laboratorio y las observaciones de campo permite realizar una caracterización geomecánica integral del talud, posibilitando la identificación de los mecanismos potenciales de inestabilidad y la determinación de las medidas de estabilización más adecuadas.

Contenido Granulométrico

El ensayo de granulometría para las exploraciones geotécnicas proporciona una aproximación del tipo de material encontrado en sitio. En este caso particular, y de acuerdo con este ensayo, se encontró que los materiales predominantes corresponden a granulares con una pequeña porción de finos. Esta composición da a entender que el terreno posee buenas características de drenaje, sin embargo, es importante considerar que la presencia de finos, aunque en pequeña cantidad, puede influir en el comportamiento del suelo bajo ciertas condiciones de humedad.

Sondeo 1

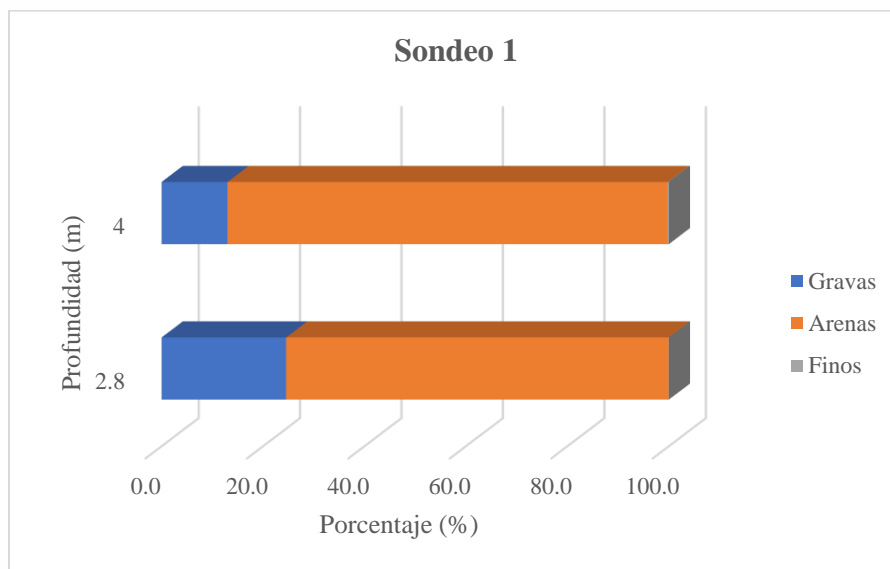
A partir del nivel cero definido para la exploración y hasta una profundidad de 3.40 m, se caracterizó mediante ensayo de granulometría, encontrándose que en mayor medida se tiene presencia de materiales granulares distribuidos de la siguiente manera: Las gravas corresponden a un porcentaje de 24.6% y las arenas a un 75.4 %. El material fino a esta profundidad se puede considerar casi despreciable con un 0.06%.

Posteriormente, en una profundidad de 3.40 m hasta los 4.6 m el porcentaje de gravas experimentó una leve disminución llegando al 13% mientras que las arenas aumentaron hasta un

86.8%. Estas condiciones dan a entender, que los finos siguen estando presentes, pero en un porcentaje mínimo (0.22%).

Figura 29

Distribución Granulométrica Sondeo 1



Nota: En el sondeo 1, a lo largo de toda la profundidad prevalecen las arenas con un porcentaje alto respecto a los otros materiales.

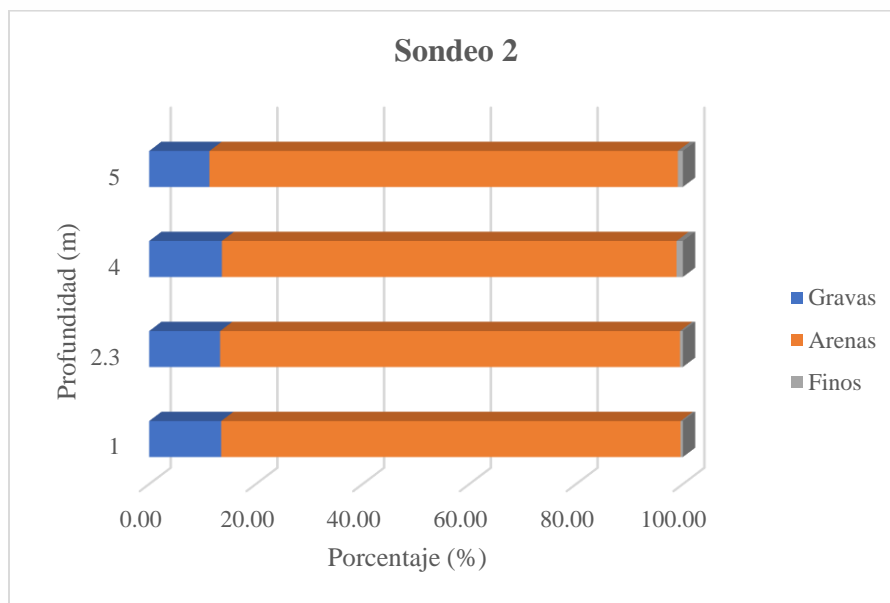
Sondeo 2

Desde el nivel cero de exploración y hasta los 8.60 m se llevaron a cabo varios ensayos de granulometría que permitieron establecer el contenido de cada tipo de material. De los resultados obtenidos se encontró que el porcentaje de gravas oscila entre el 11.29% y el 13.49% mientras que las arenas se encuentran en una mayor proporción con porcentaje mínimo de 85.2% y un máximo de 87.76%.

Finalmente, el contenido de finos encontrado mediante los ensayos de granulometría no supera el 1.19%, es decir, corresponde a una proporción mínima.

Figura 30

Distribución Granulométrica Sondeo 2



Nota: En el sondeo 2, a lo largo de toda la profundidad prevalecen las arenas con un porcentaje alto respecto a los otros materiales.

Con los resultados encontrados se concluye que, debido a estos materiales del sector, se puede tener una alta capacidad de carga y baja compresibilidad; mejorando estas condiciones con el aumento de la densidad relativa y el tamaño de las partículas. Su comportamiento geotécnico puede variar significativamente dependiendo de la distribución granulométrica, la forma de las partículas, el contenido de humedad y la presencia de finos, factores críticos en el diseño y análisis geotécnico, más aún al tratarse de la estabilización de taludes.

Variación de la Humedad y los Límites de Consistencia

Las muestras del talud fueron analizadas para determinar límites de consistencia y contenido de humedad natural. Estos parámetros caracterizan el estado del material y su comportamiento mecánico. La correlación entre estas propiedades indica el estado tensional del material y su respuesta ante sollicitaciones externas, siendo clave para la caracterización geomecánica.

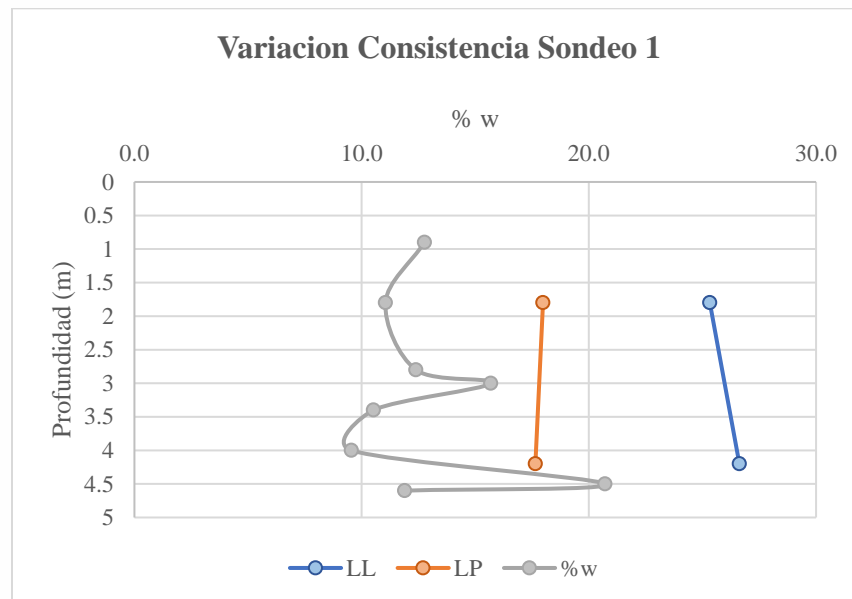
Sondeo 1

El contenido de humedad se mantiene por debajo del límite plástico hasta una profundidad de 4.2 m, lo que indica que el material presenta una consistencia semisólida. Sin embargo, a partir de los 4.5 m de profundidad, se observa un cambio significativo en el comportamiento del suelo, pasando a una consistencia plástica (Figura 31). Este cambio abrupto en las condiciones de humedad indican una zona de debilidad potencial donde podría localizarse la superficie de falla.

La transición de un estado semisólido a plástico representa un aumento evidente de la presión de poros y la relación de vacíos que a su vez genera disminución considerable en la resistencia al corte del material. Considerando este análisis, se puede inferir que la superficie de falla crítica del talud, en el sondeo 1, probablemente se desarrolla a una profundidad aproximada entre 4.2 y 4.5 m, donde ocurre esta transición de consistencia. Esta zona representa un plano de debilidad donde las fuerzas cortantes pueden superar la resistencia del material.

Figura 31

Consistencia del Suelo Sondeo 1



Nota: Se muestran los cambios en la humedad del material a lo largo del sondeo 1, evidenciándose a su vez el cambio en la consistencia.

Sondeo 2

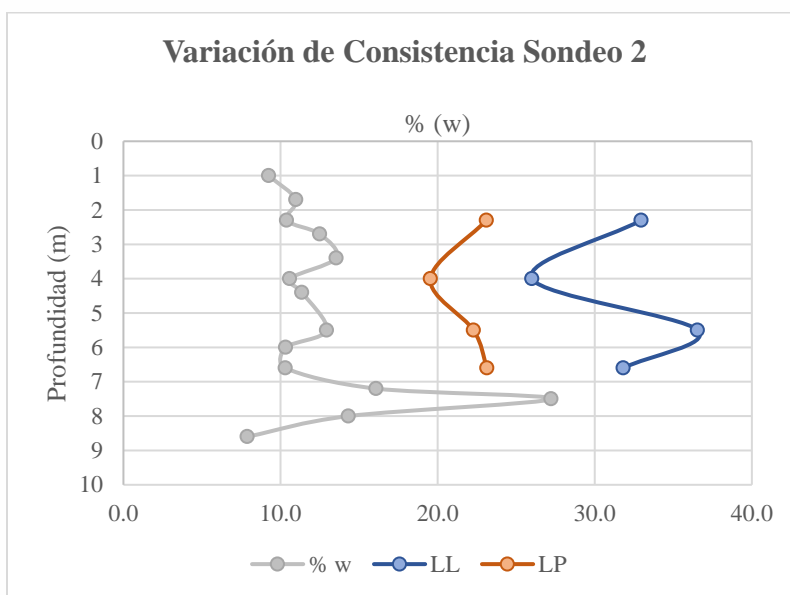
El sondeo 2 demostró una consistencia semisólida del suelo hasta los 7.4 m de profundidad, con un porcentaje de humedad inferior a los límites de Atterberg. A partir de este punto, se observa un cambio brusco en el contenido de humedad, provocando una transición temporal a consistencia plástica. Sin embargo, el suelo retorna a su estado semisólido, manteniéndose así hasta alcanzar los 8.60 m de exploración (Figura 32). Esta zona de transición identificada a los 7.4 m representa un punto crítico donde potencialmente podría ubicarse la profundidad de falla. Aunque el suelo recupera su consistencia semisólida a mayor profundidad, esta discontinuidad afecta en las

propiedades mecánicas del perfil estratigráfico constituye un punto vulnerable donde las fuerzas desestabilizadoras podrían concentrarse bajo condiciones desfavorables de carga o saturación.

El análisis de las condiciones de humedad revela dos potenciales profundidades de falla en el talud: a 4.5 m en el primer sondeo y a 7.4 m en el segundo. Esta variación sugiere un mecanismo de falla curvo o rotacional que se inicia en zonas más superficiales y se profundiza al alejarse del pie del talud. Cualquier intervención para estabilizar el talud deberá considerar estas profundidades críticas identificadas.

Figura 32

Consistencia del Suelo Sondeo 2



Nota: Se muestran los cambios en la humedad del material a lo largo del sondeo 1, evidenciándose a su vez el cambio en la consistencia.

Variación de la Resistencia Mediante Ensayo de Corte Directo

Sondeo 1

En el sondeo 1, la resistencia del material se determinó únicamente para el primer estrato, el cual presenta una tonalidad marrón según se observa en el perfil estratigráfico. El ensayo arrojó un ángulo de fricción de **25°** y una cohesión de **0.65 kg/cm²**, valores que serán objeto de análisis más adelante. Para el segundo estrato, aunque se logró obtener una muestra inalterada, esta no presentaba la consistencia necesaria para efectuar el ensayo de resistencia, posiblemente debido a su alto contenido de humedad o a la presencia de flujos de agua subterránea.

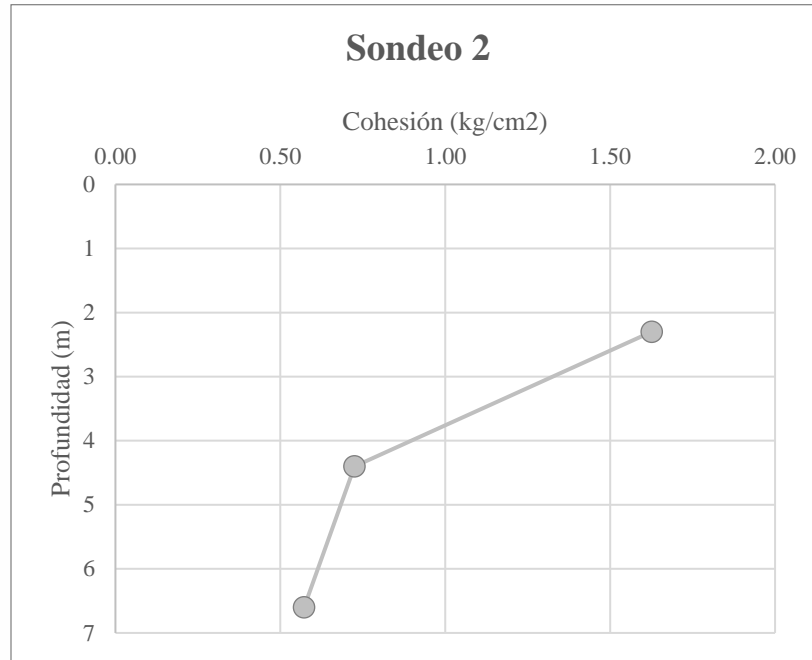
Sondeo 2

En el sondeo 2, inicialmente se observó un incremento de la cohesión con la profundidad, lo cual es congruente con el aumento de la presión de confinamiento. Sin embargo, a los 4 m de profundidad se identificó una notable reducción en los valores de cohesión, lo que sugiere la presencia de una discontinuidad o zona de debilidad en el perfil estratigráfico. Esta reducción podría atribuirse a:

- Un cambio en la composición mineralógica o granulométrica del suelo a esta profundidad.
- La presencia de una superficie de contacto entre estratos con diferentes propiedades geotécnicas.
- Un plano de debilidad preexistente que no necesariamente coincide con la zona de mayor humedad

Figura 33

Variación de la Cohesión

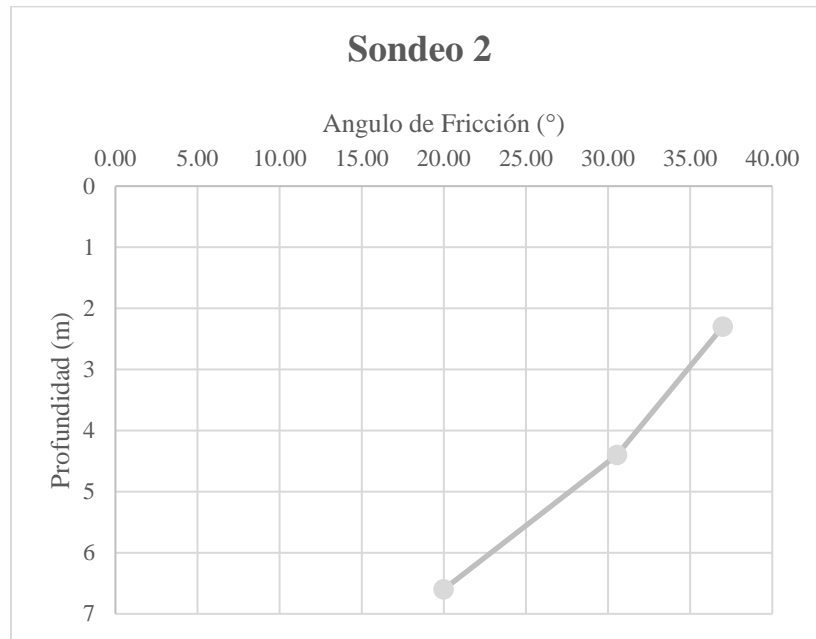


Nota: Se observa un aumento de la cohesión a mayor profundidad.

Por otro lado, el ángulo de fricción experimentó decrecimiento a medida que se profundizó en la exploración (Figura 34); esta situación se da como resultado de factores tales como: aumento de la presión de confinamiento, cambios en la composición mineralógica del suelo y las condiciones de agua subterránea.

Figura 34

Variaciones del Ángulo de Fricción



Nota: La figura evidencia el cambio que experimenta la cohesión a lo largo de profundidad

Análisis de los Parámetros Geomecánicos

La comparación de los parámetros de resistencia con los valores de referencia del Manual de Estabilidad de Taludes (Tabla 8) mostró resultados superiores a lo esperado. De acuerdo con el análisis granulométrico realizado y la clasificación presentada en la tabla del manual, el material corresponde a una arena suelta de tamaño uniforme, lo cual hace más evidente la inconsistencia en los valores de resistencia obtenidos.

Tabla 8

Propiedades Típicas de Suelos y Rocas

Descripción		Peso unitario (saturado/seco)	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)
Tipo	Material	kN/m ³		
	Arena suelta, tamaño de grano uniforme	19/14	28-34	
	Arena densa, tamaño de grano uniforme	21/17	32-40	
	Arena suelta, diferentes tamaños de grano	20/16	34-40	
	Arena densa, diferentes tamaños de grano	21/18	38-46	
	Grava, tamaño de grano uniforme	22/20	34-37	
Sin cohesión	Arena y grava, mezcla de tamaños	19/17	48-45	
	Roca fracturada o volada: Basalto	22/17	40-50	
	Roca fracturada o volada: Granito	20/17	45-50	
	Roca fracturada o volada: Limolita	19/16	35-40	
	Roca fracturada o volada: Arenisca	17/13	35-45	
	Roca fracturada o volada: Lutita	20/16	30-35	
	Montmorillonita (bentonita blanda)	13/6	7-13	10-20
	Arcilla orgánica muy blanda	14/6	12-16	10-30
	Arcilla blanda, ligeramente orgánica	16/10	22-27	20-50
	Arcilla Glaciar blanda	17/12	27-32	30-70
	Arcilla glaciar rígida	20/17	30-32	70-150
	Rocas ígneas duras:			
	granito, basalto, pórfidos	25 a 30	35-45	35000- 55000
Cohesivos	Rocas metamórficas			
	cuarcita, neiss, pizarras	25 a 28	30-40	20000- 40000
	Rocas sedimentarias duras			
	limolita, dolomita, arenisca	23 a 28	35-45	10000- 30000
	Rocas sedimentarias blandas			
	arenisca, carbón, lutita	17 a 23	25-35	1000- 20000

Nota: Valores ángulos de fricción. Tomado de *Manual de estabilidad de taludes* [Tabla] por (Invías, 1998).

La discrepancia puede atribuirse principalmente a dos factores: la realización de algunos ensayos en condiciones de muestras remoldeladas y posibles variaciones en la calibración del

equipo utilizado. Estas condiciones pueden haber influido en la sobreestimación de los parámetros de resistencia del suelo, situación que debe considerarse al momento de realizar los análisis de estabilidad (análisis numéricos).

Profundidad de Falla

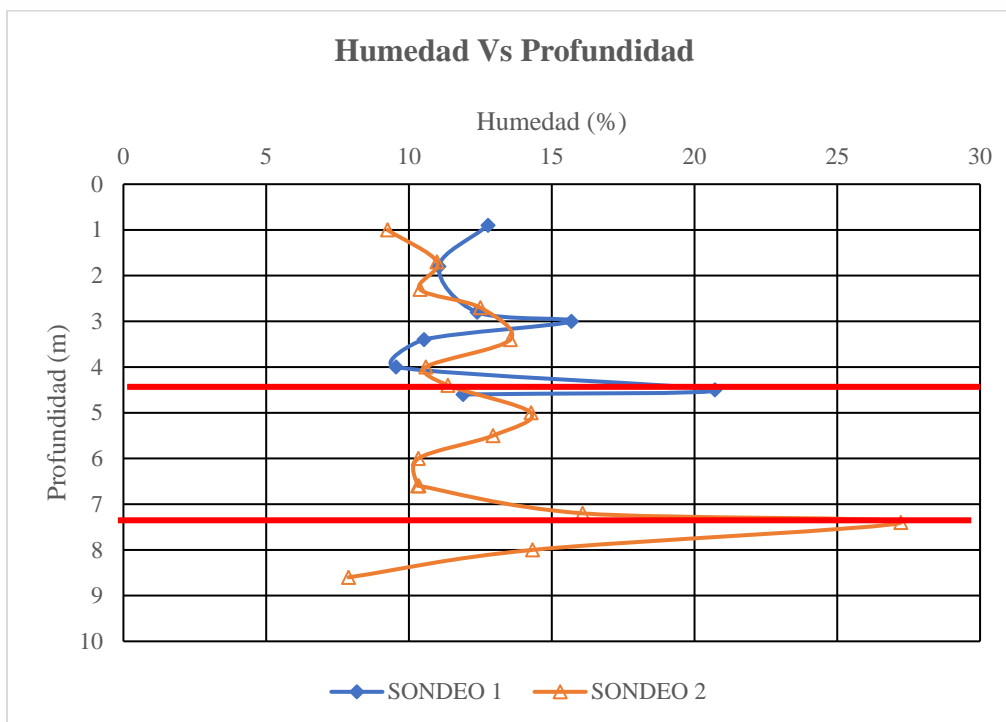
Con base en los cambios significativos de humedad encontrados en cada uno de los sondeos, se puede inferir la profundidad de falla a través de la cual se está produciendo el deslizamiento. En el sondeo 1, esta profundidad se identifica a 4 m, mientras que en el sondeo 2 se estableció a 7.4 m debido al marcado incremento de humedad en este nivel. Sin embargo, es importante señalar que los resultados de resistencia al corte en el sondeo 2 mostraron una notable reducción de la cohesión a los 4 m de profundidad, lo que podría indicar una zona de debilidad mecánica significativa. Esta discrepancia entre la zona de mayor humedad (7.4 m) y la de menor resistencia (4 m) sugiere un mecanismo de falla complejo donde la superficie crítica de deslizamiento podría estar condicionada principalmente por la resistencia del material, aunque la acumulación de agua a mayor profundidad actúe como factor desencadenante o agravante de la inestabilidad

El incremento de humedad en la superficie de falla del talud disminuye su estabilidad al reducir la succión matricial y las fuerzas capilares entre partículas. Esto modifica los parámetros geomecánicos, disminuyendo tanto el ángulo de fricción efectivo como la cohesión aparente, lo que resulta en menor resistencia al corte. Como señala Bautista Carrascosa (2022), el aumento de

humedad facilita el deslizamiento de partículas al adsorberse en su superficie, existiendo un contenido de humedad óptimo donde la probabilidad de falla alcanza su máximo.

Figura 35

Cambio en las Condiciones de Humedad



Nota: La variación de la humedad fue determinada en los dos sondeos definidos en línea recta tomando como punto de referencia la corona del talud.

Por otro lado, de acuerdo con (Camacho Angarita et al, 2023), los taludes son sensibles a las precipitaciones y su respuesta puede manifestarse en forma de deslizamientos, siendo las condiciones específicas de cada ladera y su régimen de lluvias únicos para cada sitio. La condición inicial de humedad, determinada por las precipitaciones previas y el ciclo hidrológico, es crucial para establecer el umbral de agua e intensidad necesarios para desencadenar un movimiento. Es

importante destacar que la estabilidad del talud puede mantenerse durante varios eventos de lluvia; sin embargo, una precipitación posterior, incluso de baja intensidad, podría elevar la presión de poros hasta un nivel crítico suficiente para provocar el deslizamiento.

Perfil Geotécnico y Perfiles de Análisis

La caracterización geotécnica del sector Puerto Genaro se fundamentó en la realización de dos sondeos exploratorios, a partir de los cuales se construyó el perfil geotécnico inicial que permitió comprender la distribución espacial de los estratos en el subsuelo. Los datos obtenidos en campo mediante los sondeos, complementados con los resultados de los ensayos de laboratorio, facilitaron la identificación de las diferentes capas de materiales y la determinación de sus propiedades geotécnicas.

Secciones de Modelación

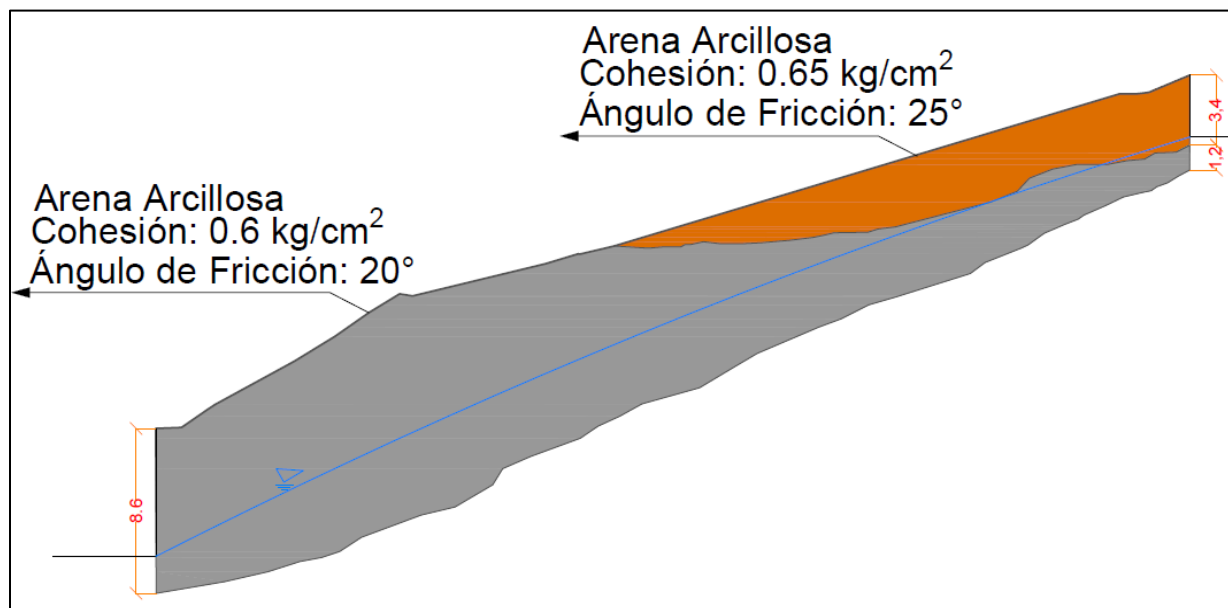
Se identificaron dos secciones críticas del talud, caracterizadas por presentar las pendientes más pronunciadas del sector. Para estas secciones, se realizó una interpolación estratigráfica tomando como base las profundidades y características de los materiales encontrados en los sondeos originales. Esta metodología de interpolación permitió extender el conocimiento geotécnico a las zonas no exploradas directamente, manteniendo la consistencia con los datos observados en los sondeos.

Las secciones encontradas a partir del levantamiento topográfico, representan las condiciones más críticas del talud debido a su geometría y pendiente. Estas mantienen las propiedades geotécnicas identificadas en los sondeos originales (Anexo II), permitiendo un

análisis representativo de la estabilidad en las zonas de mayor susceptibilidad a presentar deslizamiento.

Figura 36

Perfil Geotécnico del Talud en Análisis



Nota: Para el talud en estudio, se observa el predominio de materiales granulares. La estratigrafía revela una composición heterogénea en la que se presentan dos tonalidades para un mismo material.

Los parámetros geotécnicos utilizados en la modelación fueron seleccionados considerando la condición más desfavorable de resistencia del material, obtenidos directamente de los ensayos de laboratorio realizados. Específicamente, se eligieron los valores mínimos de cohesión y ángulo de fricción encontrados en las muestras extraídas del estrato donde se localiza la probable superficie de falla.

Análisis de Estabilidad por Modelación Numérica

Se evaluó la estabilidad del talud mediante modelación numérica en Plaxis y Slide, analizando un movimiento rotacional bajo tres escenarios: condiciones normales, nivel freático crítico y variables sísmicas. El análisis se fundamentó en el perfil estratigráfico obtenido de exploraciones de campo y ensayos de laboratorio, utilizando los valores más críticos de cohesión y ángulo de fricción para representar las condiciones más desfavorables. Este enfoque permitió definir estrategias de mitigación efectivas para garantizar la estabilidad del terreno. Las secciones modeladas corresponden a las de máxima pendiente identificadas en la planta topográfica (Figura 22).

Análisis de Condiciones Normales- Secciones de Máxima Pendiente.

En esta etapa se evaluó únicamente la acción del peso propio del material como condición de carga, excluyendo la influencia del nivel freático y los parámetros sísmicos. Para garantizar resultados coherentes, se implementaron variables representativas (cohesión, ángulo de fricción, pesos unitarios, etc) que permitieron modelar las condiciones geotécnicas con precisión (Tabla 9)

Tabla 9

Datos de Entrada Modelación en Condiciones Normales

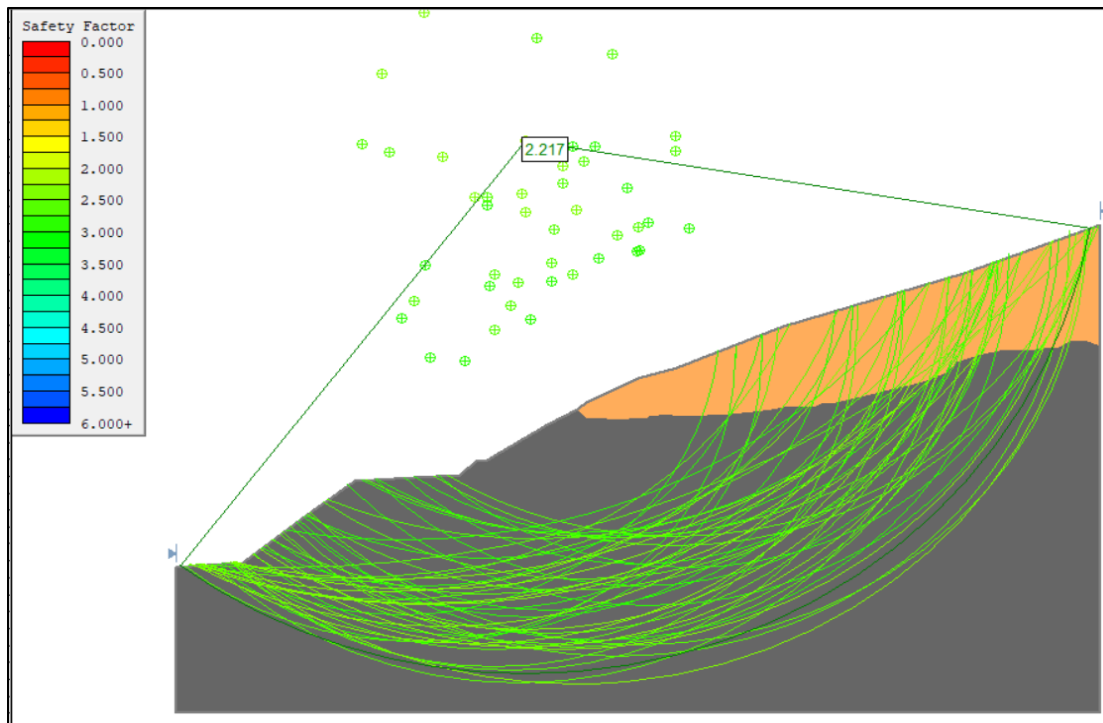
Datos De Entrada		
PARAMETRO	Valor	
	Material 1 (SC)	Material 2 (SC)
Cohesión (Cu) (kPa)	56.1	47.56
Angulo de Fricción (ϕ) ($^{\circ}$)	20.0	25.0
Peso unitario total (γ_T) (kN/m ³)	21.0	20.7
Peso unitario seco (γ_d) (kN/m ³)	18.6	18.8

Nota: En la tabla se muestran los parámetros encontrados de los ensayos de laboratorio.

Sección 1 de Máxima Pendiente

Figura 37

Estabilidad Global mediante Equilibrio Límite- Sección 1 (Terreno)- Slide

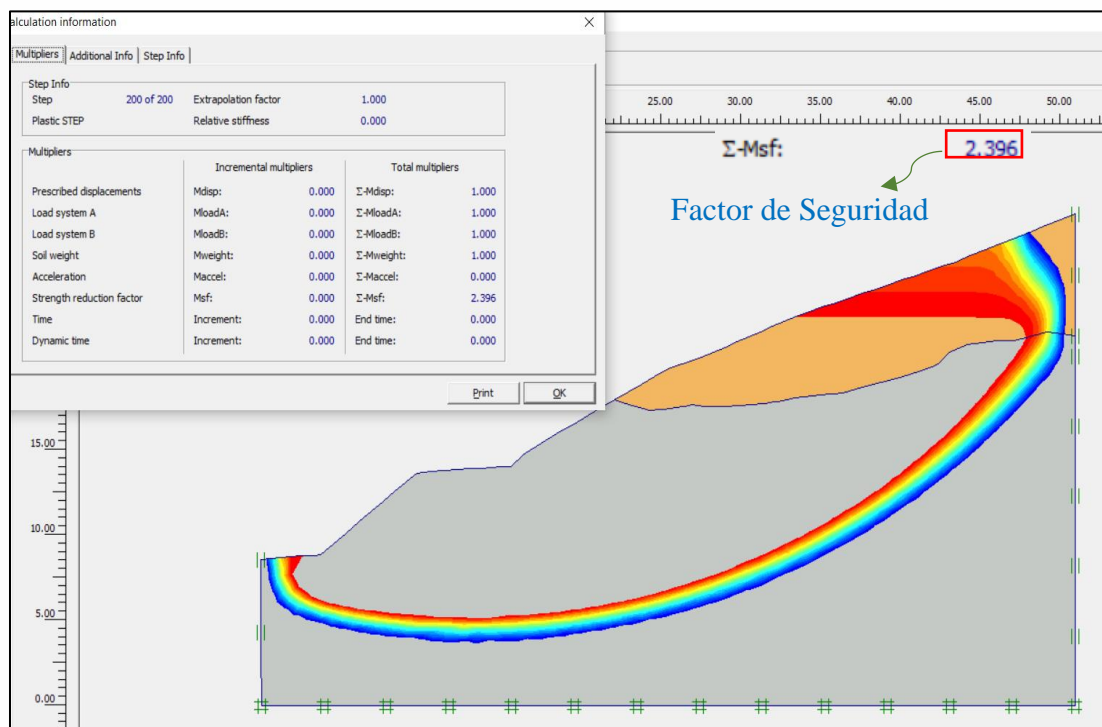


Nota: Este valor del factor de seguridad corresponde al global encontrado para el talud. Modelación sección 1 de máxima pendiente. [Imagen generada con Slide]

En el análisis de estabilidad realizado para la sección 1 de máxima pendiente, se obtuvo un factor de seguridad de **2.217** en condiciones normales (**únicamente el peso propio de los materiales**), el cual supera considerablemente el valor mínimo requerido de 1.5 establecido por la normativa para condiciones estáticas. Este resultado indica que el talud presenta una condición muy favorable de estabilidad.

Figura 38

Estabilidad Global Mediante Elementos Finitos- Sección 1 (Terreno)-Plaxis



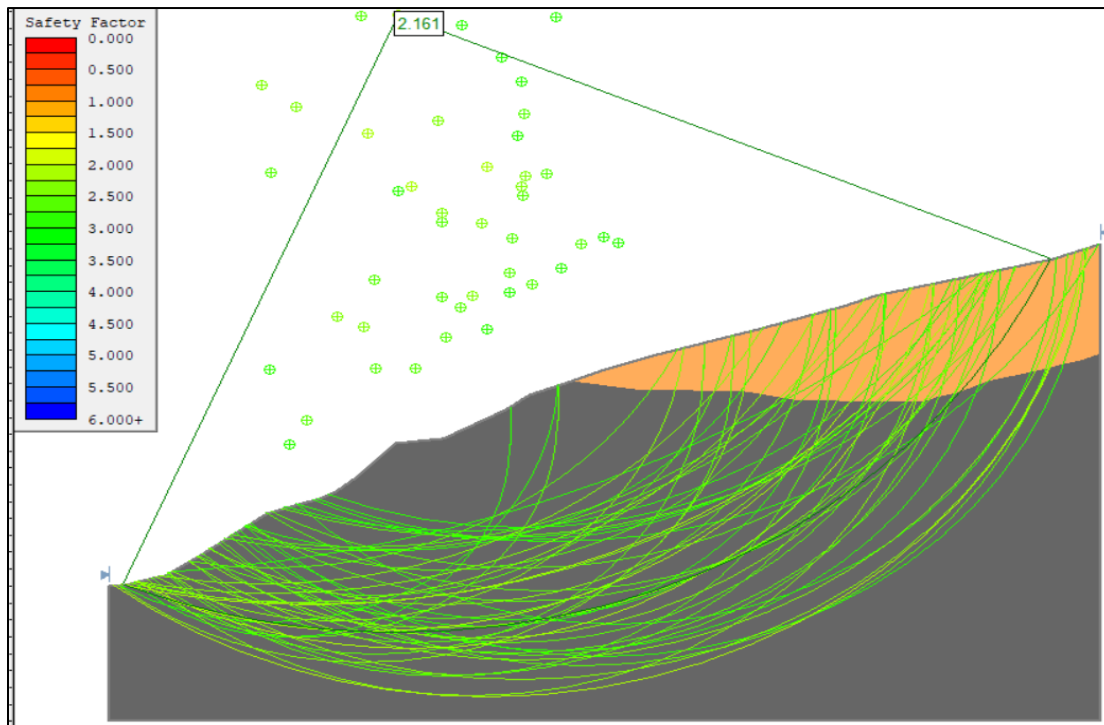
Nota: La figura muestra el análisis por medio de Elementos Finitos para la sección 1. Modelación sección 1 de máxima pendiente. [Imagen generada con Plaxis].

La modelación mediante elementos finitos reveló un factor de seguridad de **2.396**, mostrando un leve incremento en comparación con los resultados obtenidos por el método de equilibrio límite. Este aumento, aunque marginal, sugiere diferencias en la interpretación de la estabilidad del talud entre ambas metodologías.

Sección 2 de Máxima Pendiente

Figura 39

Estabilidad Global mediante Equilibrio Límite- Sección 2 (Terreno)- Slide

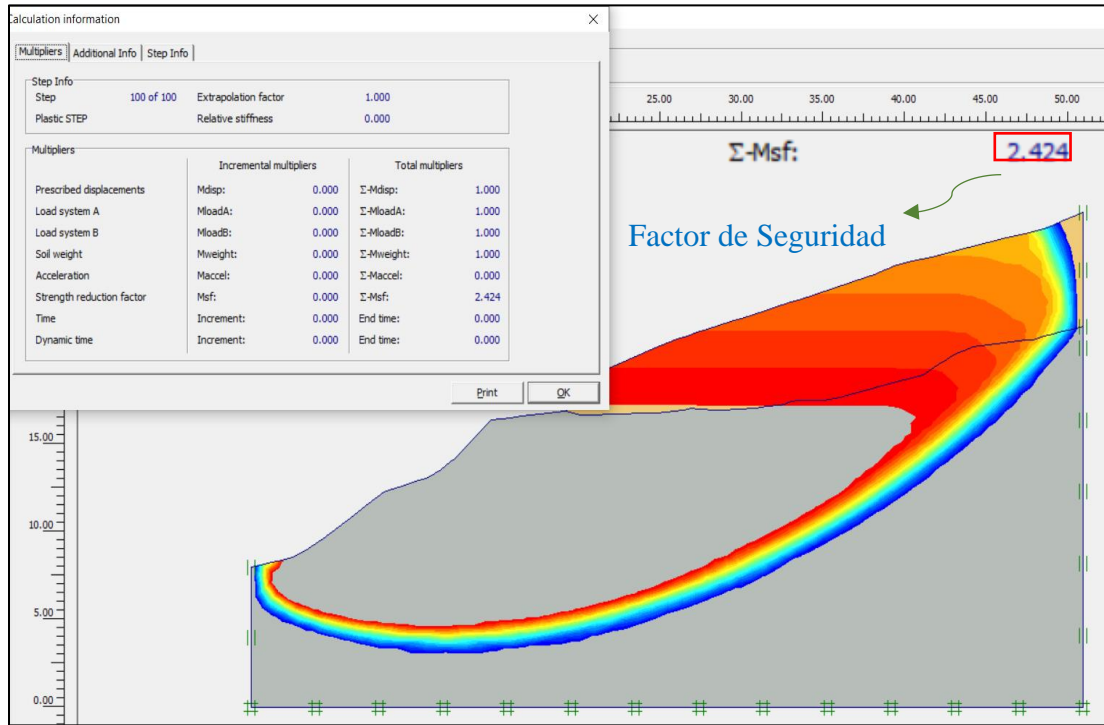


Nota: La estabilidad Global en la sección 2 corresponde a 2.161. Modelación sección 2 de máxima pendiente. [Imagen generada con Slide]

Al igual que en la sección 1 de máxima pendiente, en esta sección transversal analizada, se encontró que las condiciones de estabilidad son óptimas, dado que la magnitud del factor de seguridad indica que las fuerzas resistentes son más del doble que las fuerzas actuantes. Esta condición indica que no hay una zona específica de falla.

Figura 40

Estabilidad Global Mediante Elementos finitos- Sección 2 (Terreno)



Nota: El factor de seguridad para la sección 2 analizada mediante el método de elementos finitos, presenta variación respecto a lo encontrado con el método de equilibrio limite.

En la modelación de la sección 2 mediante elementos finitos, se determinó un factor de seguridad de **2.424**, superando el valor mínimo de 1.5 establecido por la normativa para condiciones estáticas. Este resultado confirma las condiciones de estabilidad adecuadas del talud bajo análisis numérico.

Análisis bajo condiciones de saturación total- Secciones de Máxima Pendiente

En el estudio geotécnico, se implementaron los resultados de los ensayos de laboratorio, considerando la presencia del nivel freático en la superficie del terreno, lo que incrementó

significativamente la complejidad del análisis de estabilidad. Esta condición crítica implica una reducción sustancial de la resistencia al corte del suelo, debido al aumento de presiones intersticiales y la disminución de esfuerzos efectivos.

La modelación numérica permitió simular este escenario adverso, evaluando la respuesta del talud bajo estas condiciones de saturación máxima, lo que facilitó la identificación de zonas potencialmente inestables.

Tabla 10

Datos de Entrada Modelación en Condiciones de Saturación Total

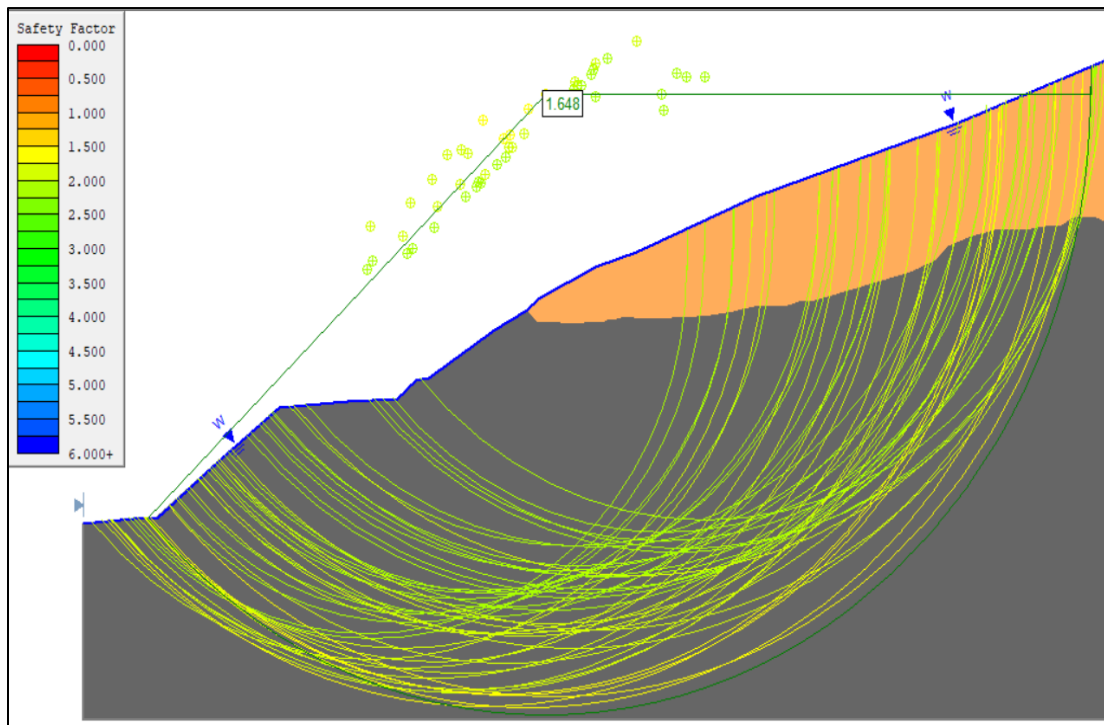
Datos De Entrada		
PARAMETRO	Valor	
	Material 1 (SC)	Material 2 (SC)
Cohesión (Cu) (kPa)	56.1	47.56
Angulo de Fricción (ϕ) ($^{\circ}$)	20.0	25.0
Peso unitario total (γ_T) (kN/m ³)	21.0	20.7
Peso unitario seco (γ_d) (kN/m ³)	18.6	18.8
Nivel Freático	En superficie	

Nota: En la tabla se muestran los parámetros encontrados de los ensayos de laboratorio.

Sección 1 de máxima pendiente

Figura 41

Estabilidad Global Equilibrio Limite- Sección 1 (Condiciones de Saturación)- Slide



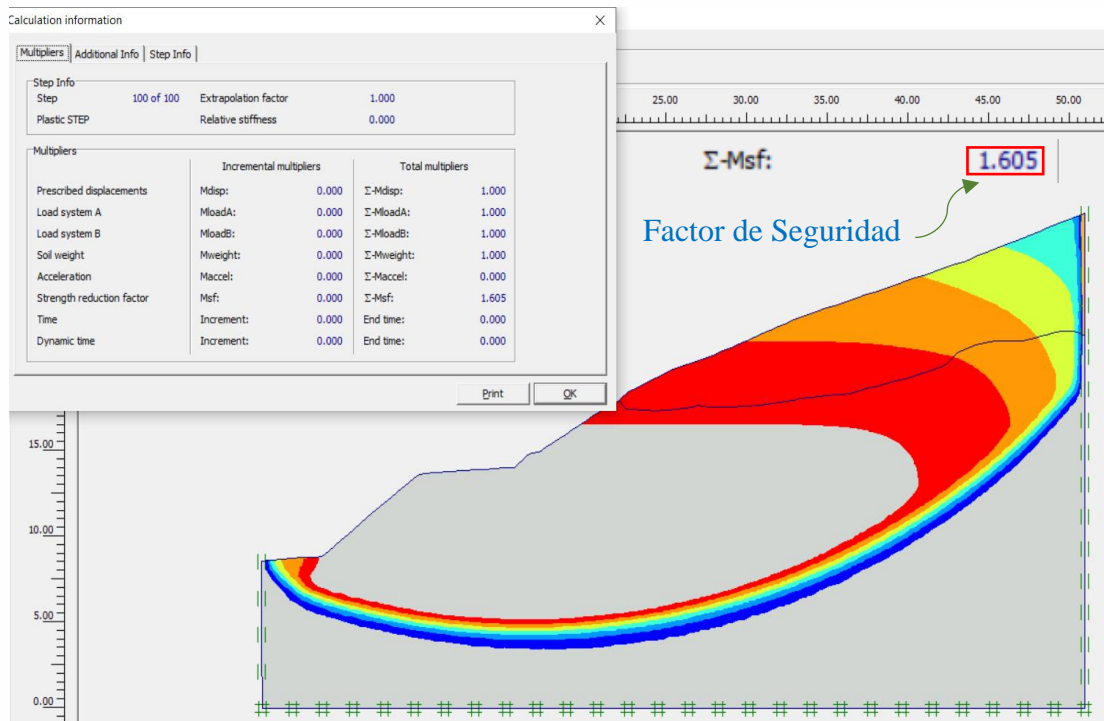
Nota: Esta resulta ser una de las condiciones más desfavorables que disminuyen la resistencia a la corte efectiva y por ende aumentan la susceptibilidad de falla. Modelación de sección 1 con saturación total [Imagen generada con Slide].

En el análisis de estabilidad considerando condiciones críticas, donde se simuló la presencia de **nivel freático sobre la superficie del terreno**, se obtuvo un factor de seguridad de **1.648**, valor que, aunque disminuyó significativamente respecto al análisis en condiciones normales, aún se mantiene cercano al valor mínimo requerido de 1.5 establecido por la normativa para condiciones estáticas. Esta reducción en el factor de seguridad evidencia el efecto adverso

que tiene la saturación del suelo en la estabilidad del talud, ya que el agua genera presiones de poros que disminuyen la resistencia al corte del material.

Figura 42

Estabilidad Global Mediante Elementos Finitos- Sección 1(Condiciones de Saturación)-Plaxis



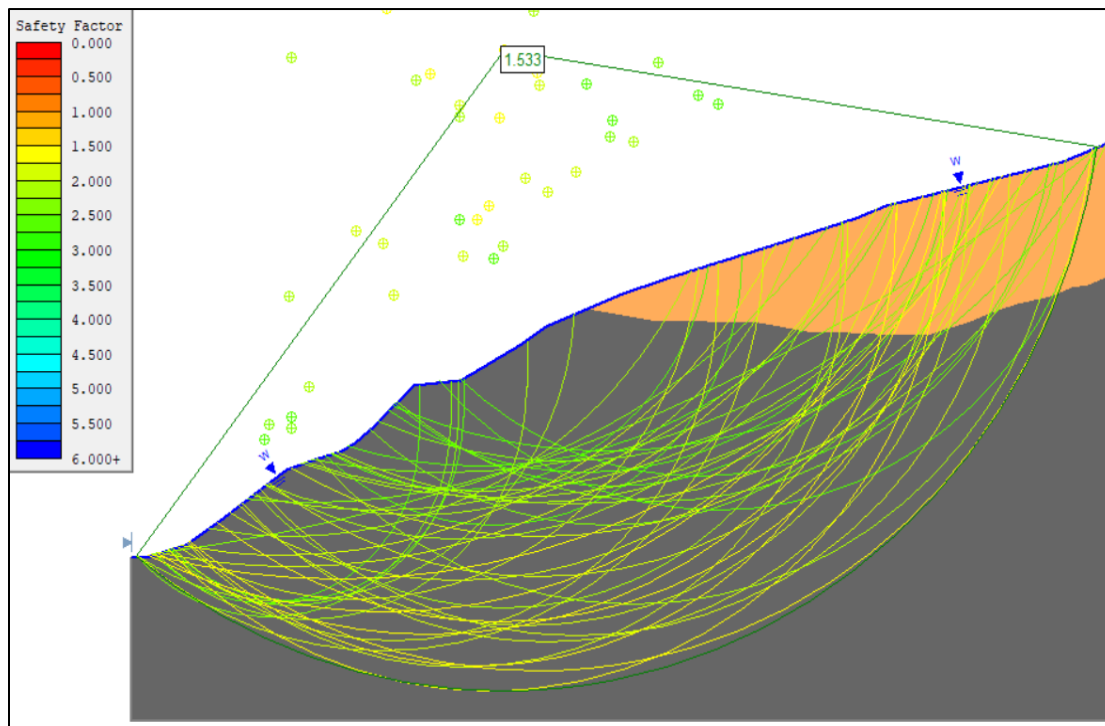
Nota: En Plaxis se evidencia una reducción considerable en el factor de seguridad ante condiciones de saturación.

La modelación numérica con Plaxis para la sección 1, considerando condiciones de saturación máxima, se obtuvo un factor de seguridad de **1.605**. Este valor indica una condición de estabilidad límite, donde el margen entre la resistencia disponible y las fuerzas actuantes es relativamente reducido, sugiriendo una vulnerabilidad potencial del talud ante cargas adicionales o cambios en las condiciones hidrogeológicas.

Sección 2 Máxima Pendiente

Figura 43

Estabilidad Global mediante Equilibrio Límite- Sección 2 (Condiciones de Saturación)- Slide



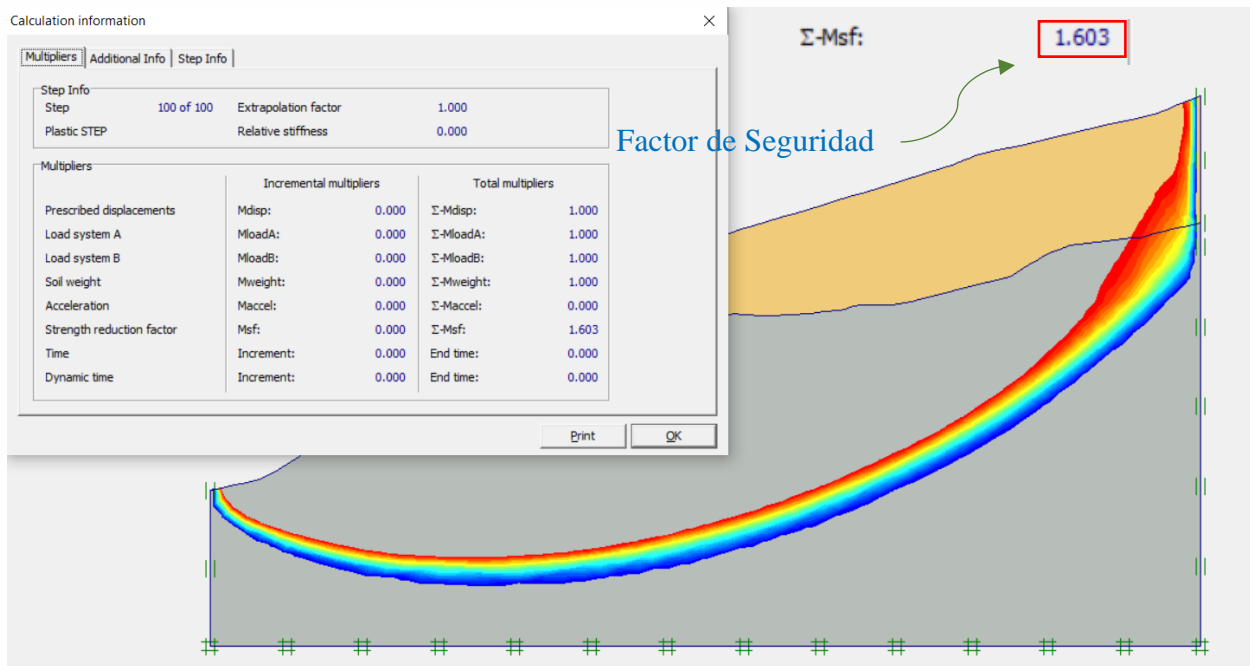
Nota: A nivel global se presenta una reducción considerable del factor de seguridad. Esto indica que el agua genera un gran impacto en esta parte del talud. [Imagen generada con Slide].

Mediante la aplicación del método de equilibrio límite en la segunda sección, se determinó un factor de seguridad de **1.533**, valor que evidencia una condición crítica de estabilidad, ubicándose por debajo del valor mínimo establecido por la normativa. Esto indica que el talud se

encuentra en un estado cercano al colapso, lo que recomienda la implementación de medidas de estabilización.

Figura 44

Estabilidad Global Mediante Elementos Finitos- Sección 2 (Condiciones de Saturación)-Plaxis



Nota: Ante la presencia del nivel freático se aumenta la presión de poros, reflejándose en la disminución del factor de seguridad.

En este caso el factor de seguridad resultó ser de **1.604**, levemente superior al obtenido mediante el método de equilibrio límite (1.480), lo que ratifica la condición crítica de estabilidad. Ambos resultados se encuentran en un rango que indica un estado cercano al colapso.

Análisis bajo condiciones de Saturación Total y Sismo- Secciones Máxima Pendiente

En la evaluación Pseudoestático, se consideraron los parámetros de aceleración sísmica considerando tanto el coeficiente de aceleración horizontal (PGA) como el factor de amplificación

(F_{pga}), esto conforme a lo establecido en el Código Colombiano de Puentes (CCP-014) donde se indica las condiciones sísmicas para proyectos de tipo vial, teniendo en cuenta además que dentro de la zona de estudio se tienen suelos y no rocas

Tabla 11

Datos de Entrada Modelación en Condiciones de Saturación Total y Sismo

Datos De Entrada		
PARAMETRO	Valor	
	Material 1 (SC)	Material 2 (SC)
Cohesión (C_u) (kPa)	56.1	47.56
Angulo de Fricción (ϕ) ($^\circ$)	20.0	25.0
Peso unitario total (γ_T) (kN/m^3)	21.0	20.7
Peso unitario seco (γ_d) (kN/m^3)	18.6	18.8
PGA	0.2	
F_{pga}	1.4	
Kst	0.28	
Condiciones de Saturación	En Superficie	

Nota: En la tabla se muestran los parámetros encontrados de los ensayos de laboratorio.

El capítulo 3, numeral 3.10.2.1 del Código Colombiano de Puentes (CCP-014) establece el Coeficiente de Aceleración Pico del Terreno (PGA) para el territorio colombiano. Para la zona de estudio, este valor corresponde a 0.20. Asimismo, se determinó el factor de sitio para periodo nulo en el espectro de respuesta de aceleraciones (F_{pga}), necesario debido al cambio en las rigideces de los materiales, basado en el perfil de suelo identificado con base a la resistencia al corte no drenado de las muestras inalteradas obtenidas de los sondeos.

Tabla 12

Coefficientes Sísmicos del Municipio de Viracachá

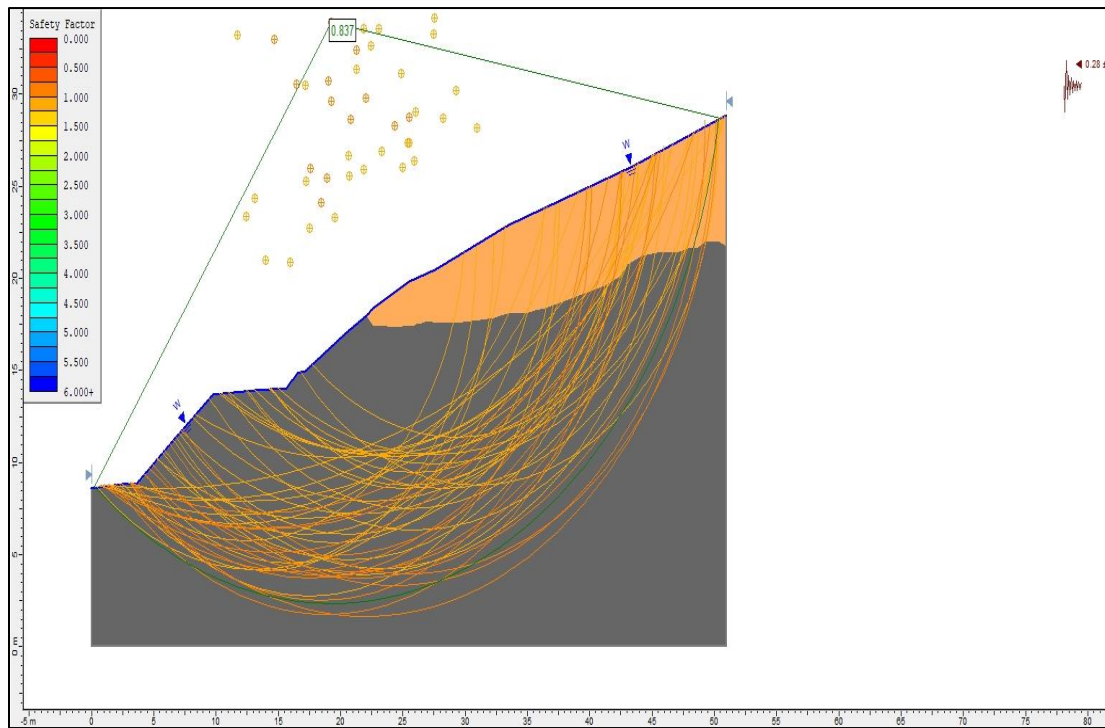
Municipio	Viracachá	Código: 15879
Parámetro	Nomenclatura	Valor
Coefficiente de Aceleración Pico del Terreno	PGA	0.2
Tipo de perfil (De acuerdo a la resistencia al corte del suelo)	Perfil	D
Factor del sitio para periodo nulo en el espectro de respuesta de aceleraciones	Fpga	1.4
Coefficiente sísmico horizontal para el diseño y análisis de estabilidad de taludes en infraestructuras viales	Kst	0.28

Nota: Esta tabla muestra variables importantes de las condiciones sísmicas del municipio. Tomado de *Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCPI4- Sección 3* (p.58), por (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2015)

Sección 1 de Análisis

Figura 45

Estabilidad Global Equilibrio Limite- Sección 1(Condiciones de Saturación+ Sismo)- Slide



Nota: Respecto a unas condiciones de saturación total, con la inclusión de un análisis de sensibilidad con las condiciones sísmicas, se experimenta una reducción del factor de seguridad. [Imagen generada con Slide].

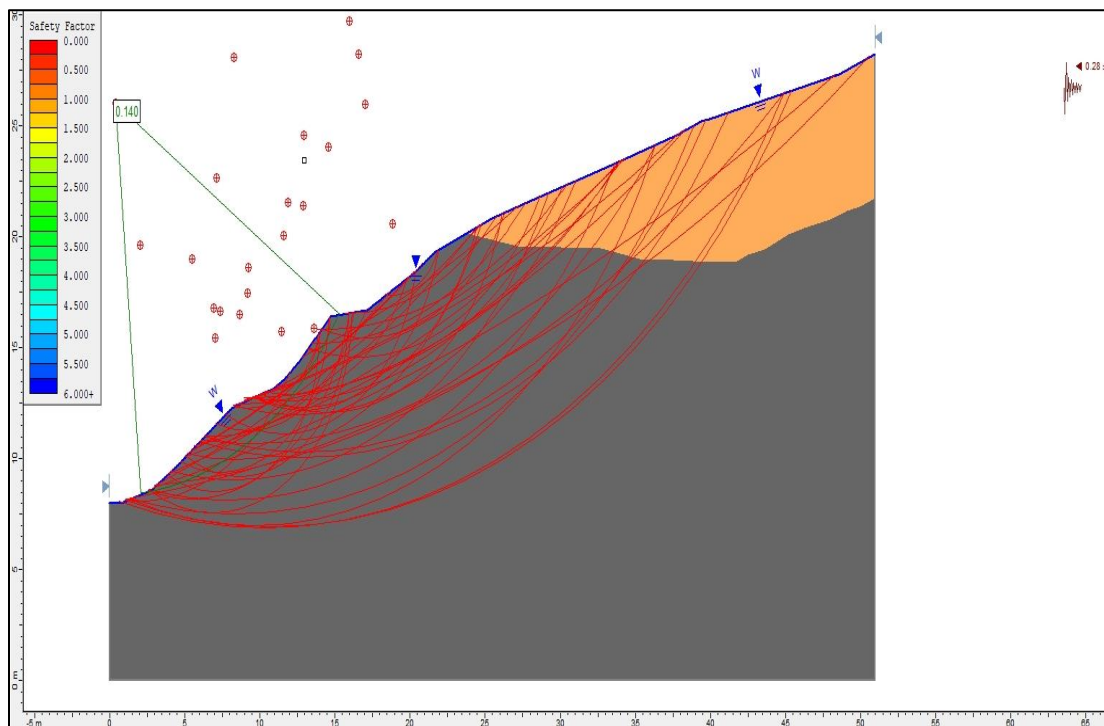
Al incorporar en el análisis las variables sísmicas bajo condiciones de saturación total, el factor de seguridad se redujo a 0.837, valor que está por debajo del mínimo requerido de 1.2 establecido por la normativa para condiciones pseudoestáticas. Esta disminución significativa del factor de seguridad demuestra el efecto combinado desfavorable que tienen las fuerzas sísmicas y la saturación del suelo en la estabilidad del talud, ya que las aceleraciones horizontales aumentan

las fuerzas desestabilizantes mientras que la presencia de agua reduce la resistencia al corte del material.

Sección 2 de Análisis

Figura 46

Estabilidad Global Mediante Equilibrio Limite- Sección 2 (Condiciones de Saturación+ Sismo)



Nota: Ante la presencia de un sismo, la sección 2 se encuentra más propensa a que se generen procesos de remoción en masa. [Imagen generada con Slide].

Al evaluar la estabilidad incluyendo los **efectos sísmicos bajo condiciones de saturación total** en la sección 2, se obtuvo un factor de seguridad de **0.140**, valor considerablemente inferior al mínimo requerido de 1.2 establecido por la normativa para condiciones pseudoestáticas. Este resultado es crítico ya que indica que las fuerzas desestabilizantes superan significativamente a las

fuerzas resistentes, lo que implica una alta probabilidad de falla del talud bajo estas condiciones extremas.

Las modelaciones mediante métodos de equilibrio límite y elementos finitos revelaron resultados fundamentales para proponer soluciones de mejoramiento del talud, identificando que la condición más crítica corresponde a saturación total combinada con variables sísmicas.

Tabla 13

Resultados de Factores de Seguridad

Sección 1 Máxima pendiente

Software de Modelación	Condición			Valor encontrado
	Terreno Natural	Terreno Natural+ Saturación	Terreno Natural+ Saturación+Sismo	
Slide	2.22	1.65	0.84	MÍNIMO
Plaxis	2.40	1.61	-	GLOBAL

Sección 2 Máxima pendiente

Software de Modelación	Condición			Valor encontrado
	Terreno Natural	Terreno Natural+ Saturación	Terreno Natural+ Saturación+Sismo	
Slide	2.16	1.53	0.14	MÍNIMO
Plaxis	2.42	1.60	-	GLOBAL

Nota: En la sección 2 se experimentaron unas condiciones más desfavorables de acuerdo al factor de seguridad, especialmente ante la presencia de condiciones sísmicas.

Estabilización del talud

De acuerdo con los resultados del análisis del factor de seguridad contra deslizamiento, se hace imperativo seguir las recomendaciones estipuladas en el Título H de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (Título H, Tabla H.4-1), el cual establece los criterios técnicos



para el diseño e implementación de metodologías de sostenimiento y estabilización de taludes, considerando las condiciones geomecánicas, geológicas y sísmicas específicas del sitio.

Para mejorar la estabilidad del talud bajo condiciones hidrogeológicas críticas, se recomienda instalar drenes horizontales para reducir la presión de poros y la acumulación de agua, disminuyendo el riesgo de deslizamientos. La modelación en PLAXIS verificó la efectividad de esta metodología, demostrando su contribución significativa a la estabilidad del talud en condiciones de alta saturación.

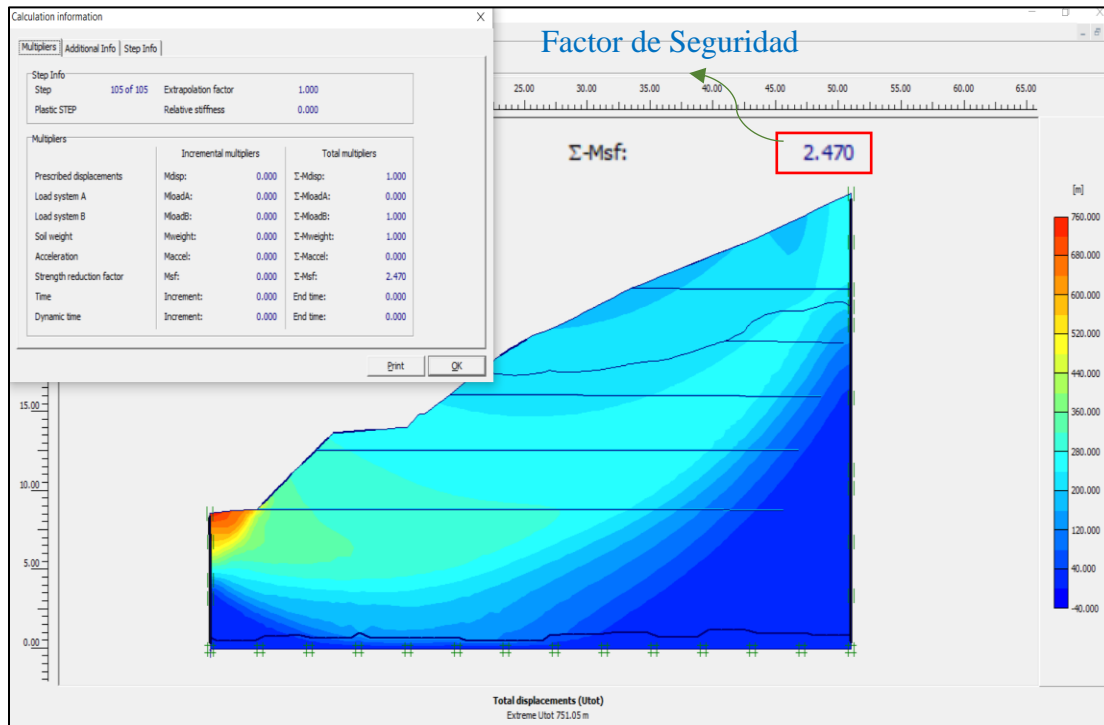
En el análisis de estabilidad geotécnica, se implementó un modelo de estado estacionario del flujo subsuperficial para determinar un coeficiente de seguridad óptimo. La metodología consideró la conductividad hidráulica heterogénea, las características anisotrópicas del subsuelo y la dinámica de líneas equipotenciales, generando una distribución de presiones intersticiales mediante redes de filtración, lo que resulta especialmente útil para evaluar taludes con geometrías complejas y condiciones estratigráficas variables.

Drenes Horizontales Sección 1- Máxima Pendiente

Dentro de las alternativas de mitigación geotécnica, se proyecta la implementación de un sistema de drenaje subsuperficial mediante la instalación de cuatro drenes horizontales. Esta solución técnica tiene como objetivo primordial modificar la red de flujo existente, reduciendo las presiones intersticiales del talud y mejorando sus condiciones de estabilidad global. Al interceptar y conducir el flujo de agua intersticial, se logra disminuir los gradientes hidráulicos, lo que se traduce en un incremento significativo del factor de seguridad del sistema geotécnico evaluado, optimizando así la estabilidad estructural del terreno.

Figura 47

Instalación de Drenes Horizontales- Sección 1



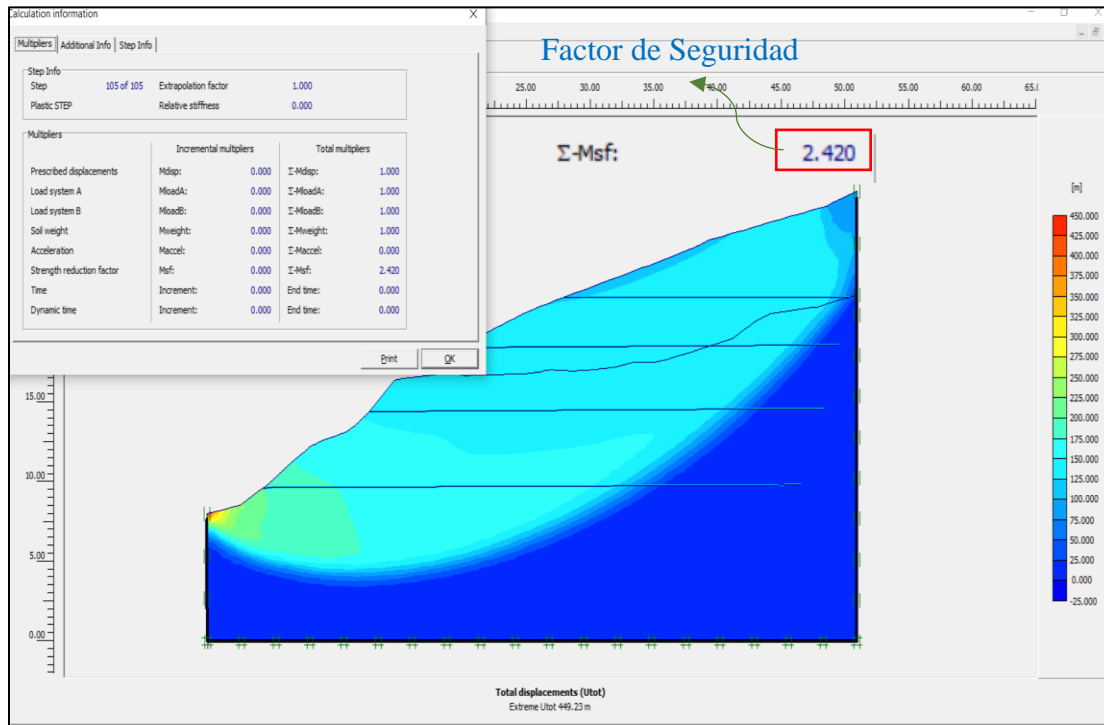
Nota: En la sección 1 con la instalación de los drenes se obtiene un valor de factor de seguridad de 2.470, es decir que se logra el drenaje total del agua.

Drenes Horizontales Sección 1- Máxima Pendiente

En la sección 2, se propone la instalación de cuatro drenes horizontales subsuperficiales, similar a la sección 1. Esta solución modifica la red de flujo, reduce las presiones intersticiales y gradientes hidráulicos, incrementando el factor de seguridad del talud.

Figura 48

Instalación de Drenes Horizontales- Sección 2



Nota: En la sección 2 con la instalación de los drenes se obtiene un valor de factor de seguridad de 2.420, es decir, se logra la disminución de las presiones de poro.

Conclusiones

- La caracterización geomecánica de los materiales mediante ensayos de laboratorio y campo reveló un comportamiento heterogéneo del suelo con variaciones significativas en sus propiedades fundamentales según la profundidad y el contenido de humedad. Específicamente, se identificó una tendencia clara de disminución en la cohesión del suelo, desde 1.6 kg/cm² a 2.3 m de profundidad hasta 0.6 kg/cm² a 6.6 m, lo que indica un debilitamiento progresivo de la estructura del suelo a medida que se profundiza. El ángulo de fricción mostró un comportamiento más variable, con fluctuaciones en diferentes niveles, destacando particularmente un valor alto a 5.5 m de profundidad para el tipo de material encontrado. Las variaciones en el contenido de humedad, específicamente cuando el suelo se encuentra saturado, demostraron ser un factor determinante en el comportamiento mecánico del suelo, afectando directamente las propiedades geomecánicas, lo que compromete significativamente la estabilidad de la ladera.
- El análisis del comportamiento geotécnico de la ladera demostró que el factor de seguridad es altamente sensible a las condiciones de saturación del material. Bajo condiciones de saturación completa, que representa el escenario más crítico, los factores de seguridad se redujeron a 1.61 y 1.53 en las secciones 1 y 2 respectivamente, valores que se encuentran en el límite del mínimo de 1.5 establecido por la normativa vigente para condiciones estáticas. Esta reducción significativa del factor de seguridad bajo condiciones de saturación, junto con la disminución adicional al considerar efectos sísmicos, identifica dos condiciones críticas fundamentales para

la estabilidad de la ladera. Estos hallazgos confirman la importancia de controlar el agua que afecta la ladera, tanto la proveniente de la precipitación como de la escorrentía superficial.

- A partir del análisis geotécnico y la modelación numérica, donde se identificó la saturación como factor crítico en la estabilidad de la ladera, se determinó que la implementación de drenes horizontales representa una solución técnica efectiva para el control de la humedad. Esta medida de drenaje permitiría reducir los niveles de saturación del talud, controlando directamente la principal causa de inestabilidad identificada en el análisis. Esta técnica resulta ser relativamente rápida, y además suele ser más económica en comparación con otras medidas de estabilización. Sin embargo, es importante señalar que esta solución requiere un mantenimiento periódico para garantizar su efectividad a largo plazo.

Recomendaciones

- Para futuras investigaciones sobre la estabilidad de taludes en condiciones críticas de humedad, se recomienda evaluar técnicas complementarias a los drenes horizontales, como la bioingeniería (revegetación con especies de raíces profundas), anclajes activos y pasivos, geotextiles, muros de contención y sistemas de drenaje avanzados (drenes subhorizontales o pozos de alivio). Estas metodologías podrían mejorar la estabilidad en escenarios de alta saturación y mitigar el riesgo de deslizamiento.
- Se recomienda la realización de ensayos triaxiales en futuras investigaciones para obtener parámetros de resistencia más precisos y reducir la incertidumbre en la modelación numérica. Además, complementar con ensayos de consolidación y permeabilidad ayudaría a mejorar la representación del comportamiento del suelo bajo condiciones de saturación.
- Para mejorar la precisión del análisis, sería útil implementar instrumentación geotécnica en el talud, como piezómetros y extensómetros, con el fin de monitorear la evolución de la estabilidad en función de la humedad y validar los resultados de la modelación numérica.
- Se recomienda realizar un análisis más detallado del comportamiento del agua subterránea mediante la modelación de flujo acoplada con estudios de estabilidad de taludes. Esto permitirá evaluar con mayor precisión cómo la saturación influye en la resistencia del suelo y en la probabilidad de falla del talud.

Bibliografía

- Bautista Carrascosa, I. (2022). *Relación entre la consistencia y la humedad del suelo*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/185001/Bautista%20-%20Relacion%20entre%20la%20consistencia%20y%20la%20humedad%20del%20suelo.pdf;jsessionid=4D17D5B9202BB1334EA40224D61B5F8D?sequence=1>
- Camacho Angarita, L., & Granados Muñoz, C. X. (2023). *El agua como agente principal de la inestabilidad de taludes*. <https://doi.org/10.16925/gclc.43>
- Cano, Á. (2021). *Análisis De Situación De Talud Con El Modelo De Los Determinantes Sociales De Salud, Municipio De Viracachá Boyacá 2021*. 19–19.
https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis2021/asis_viracacha_2021.pdf
- Corominas, J. (2015). *Tipos de Rotura en Taludes y Laderas*.
https://www.academia.edu/37552572/TIPOS_DE_ROTURA_EN_LADERAS_Y_TALUDES
- Corpochivor. (2012). *Elaboración de Estudio de Riesgo (Amenaza y Vulnerabilidad) y Diseño de Obras de Estabilización en la Vereda Galindos, Municipio de Viracacha, Jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor (Corpochivor)*.
http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19733/VIRACACHA_.pdf;jsessionid=CA6E1FC856E5184A2416706944350A52?sequence=1
- Cruz Morales, L. S., Gamboa Rayo, H. A., Juez Pirachican, M. R., & Numpaque Holguín Darío Sebastian. (2020). *Proyecto Túnel el Corredor*.

- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica Cuarta edición*.
- ESAP. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial Viracachá- Boyacá 2000*.
<https://repositoriodim.esap.edu.co/bitstream/handle/20.500.14471/11065/6057-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García Pérez, N. (2008). *Determinación de Curvas Características en suelos no saturados con celdas de Presión*. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt313.pdf>
- Google Earth. (2024). *Vista satelital del talud en estudio ubicado en el municipio de Viracachá*.
- Hernández Chaverra, A. L., & Tamayo Ruiz, Y. A. (2019). *Análisis de Estabilidad del Talud y Obras de Contención Necesarias para el diseño y construcción de una Vía de Orden Secundario en el Municipio de Dabeiba-Antioquia*.
- Highland, L. (2016). *Landslide Types and Processes*.
- IDEAM. (2024). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*.
- IGAC. (2024). *Datos Abierto Catastro- Subdirección de Cartografía y Geografía*.
<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Invias. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes*.
<https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/politicas-y-lineamientos/proyectos-de-norma/11314-manual-de-estabilidad-de-taludes-geotecnia-vial-1998>
- Mesa Lavista, M., Álvarez Pérez, J., & Chávez Gómez, J. H. (2020). Evaluación del Factor de Seguridad en Taludes de Terraplenes Carreteros Altos Ante Carga Sísmica. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 103, 1–17. <https://doi.org/10.18867/ris.103.489>

Ministerio de Ambiente, (2010). *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente.*

<https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>

Montero Olarte, J. (2017). *Clasificación de Movimientos en Masa y Su Distribución en Terrenos Geológicos de Colombia.*

<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSerias/Documentos/Clasificacion-MM-Terrenos-Geologicos-Colombia.pdf>

Pérez De Ágreda, E. (2005). *Estabilidad de Taludes.*

https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250339/2015/Tema5--Taludes.pdf

Puy Santín, A. (2005). *Capítulo 1. Introducción.*

Requelme Sáenz, C. A. (2012). *Análisis, evaluación y propuesta metodológica de estabilidad de talud en la vía Zumbi- Paquisha desde la abscisa 03+500 hasta 05+500.*

https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/2594/3/Requelme_Saenz_Cristhian_Andres.pdf

Ros Avila, J. (2008). *Metodología.*

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/05.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Salas, A. (1996). *PLAN AMBIENTAL PARA EL MUNICIPIO DE VIRACACHA-BOYACA.*

Sanz, R., Sobrecases, S., & Díaz, A. (2015). *Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo. 7.*

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf>

Suarez Díaz, J. (2012). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico: Vol. I.*

<https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico/>

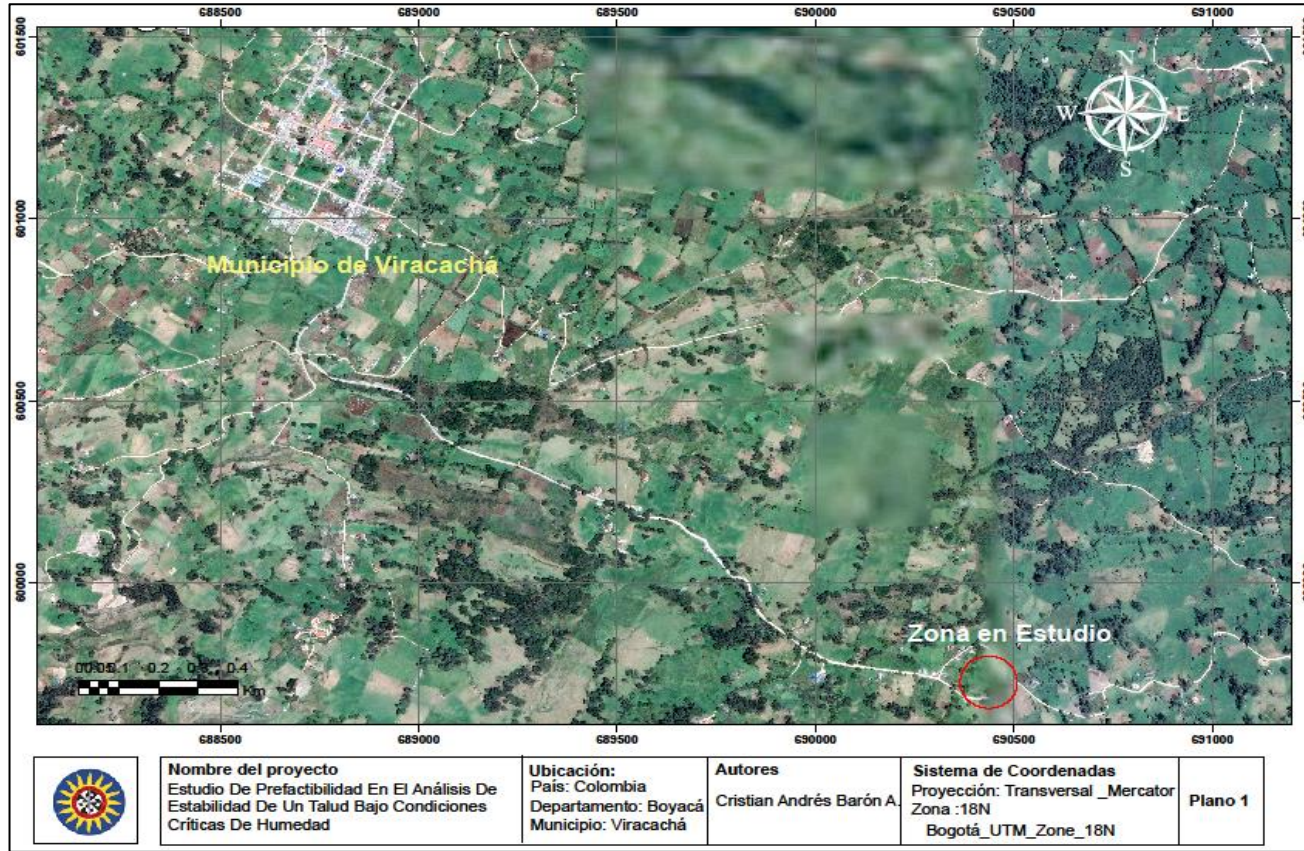
Suarez Díaz, J. (2021). *Análisis de Estabilidad de Taludes. Segunda Parte.*

<https://www.erosion.com.co/analisis-de-estabilidad-de-taludes/>

ANEXO I INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Figura 49

Localización del Proyecto en Estudio



Nota: Se observa la ubicación del proyecto. Adoptado de *Vista satelital del talud en estudio ubicado en el municipio de Viracachá*

[Imagen Satelital] por (Google Earth, 2024).

ANEXO 2

INFORMACIÓN

CLIMÁTICA

GEO TÉCNICA Y

TOPOGRÁFICA

DATOS DE PRECIPITACIÓN ESTACIONES DE INFLUENCIA

Tabla 14

Datos de Precipitación Mensual Estación Rondón.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2013	125	1317	1166	1846	3714	1681	2545	2164	1446	2229	2472	1031	21736
2014	345	637	86	2028	2262	1948	3164	169	101	1642	1086	0	13468
2015	213	212	534	1217	1477	1357	128	0	0	1025	2136	572	8871
2016	22	374	821	2783	2489	2576	3093	1909	2137	1471	2985	845	21505
2017	952	697	1943	1475	3811	2405	4317	1638	1642	1919	1301	516	22616
2018	1483	303	998	2354	3992	2585	242	2009	1161	2442	1045	161	18775
2019	618	53	888	177	2747	2976	1548	234	1793	1049	1433	998	14514
2020	447	391	813	1408	2115	2241	2786	1476	1487	1017	2647	2036	18864
2021	717	553	1764	2119	2141	3168	1936	2162	1185	1682	1695	466	19588
2022	259	996	169	1739	2612	2225	2911	1902	1701	2065	1925	50	18554
2023	2162	255	2123	2743	2081	2754	2549	199	1658	1422	781	1152	19879
PROMEDIO MULTIANUAL (mm)													18033.64

Nota: Datos de precipitación para diez años de registro para la estación Rondón. Tomado de *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos* [Tabla], por (IDEAM, 2024)

Tabla 15

Datos de Precipitación Mensual Estación Ramiriquí

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2013	0	427	713	636	1802	887	1292	1261	419	1203	1324	364	10328
2014	103	452	521	1146	74	962	1525	896	545	1053	1113	492	8882
2015	97	364	547	85	1069	2265	1287	1117	337	181	683	28	8060
2016	2	57	163	1229	1242	1203	1813	1009	106	1116	971	562	9473
2017	303	32	1339	539	1733	1649	1425	508	635	1024	615	67	9869
2018	368	272	1097	1814	2012	1595	1042	676	587	1572	113	2	11150
2019	171	57	89	791	1592	1251	112	1201	749	642	968	534	8157
2020	233	379	521	781	1154	128	1396	804	796	967	1266	571	8996
2021	396	255	1578	781	131	2096	931	98	459	164	523	105	7517
2022	3	499	945	1699	1289	1738	144	135	883	1084	1428	313	10160
2023	642	134	1765	1553	1292	1722	994	92	714	30	907	209	10054
PROMEDIO MULTIANUAL (mm)													9331.455



y Descarga de Datos Hidrometeorológicos [Tabla], por (IDEAM, 2024)

Tabla 16

Datos de Precipitación Mensual Estación Siachoque

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2013	0	458	274	497	749	189	768	357	346	103	968	22	4731
2014	35	521	36	635	1106	383	328	113	11	1546	662	196	5572
2015	64	19	711	456	158	632	87	633	92	101	198	95	3246
2016	1	21	114	1016	100	441	756	478	938	718	1709	516	6808
2017	31	776	1337	667	1186	1343	345	232	248	636	344	67	7212
2018	221	56	431	157	894	706	493	222	398	147	975	0	4700
2019	77	3	817	702	1053	433	359	554	332	465	0	91	4886
2020	283	111	593	466	659	987	901	243	444	454	1281	88	6510
2021	128	277	975	782	1102	1134	783	544	449	873	528	28	7603
2022	0	81	1079	663	1356	1534	603	369	331	976	846	355	8193
2023	361	12	891	1743	877	829	0	0	0	477	455	183	5828
PROMEDIO MULTIANUAL (mm)													5935.364

Nota: Datos de precipitación para diez años de registro para la estación Siachoque. Tomado de Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos [Tabla], por (IDEAM, 2024)

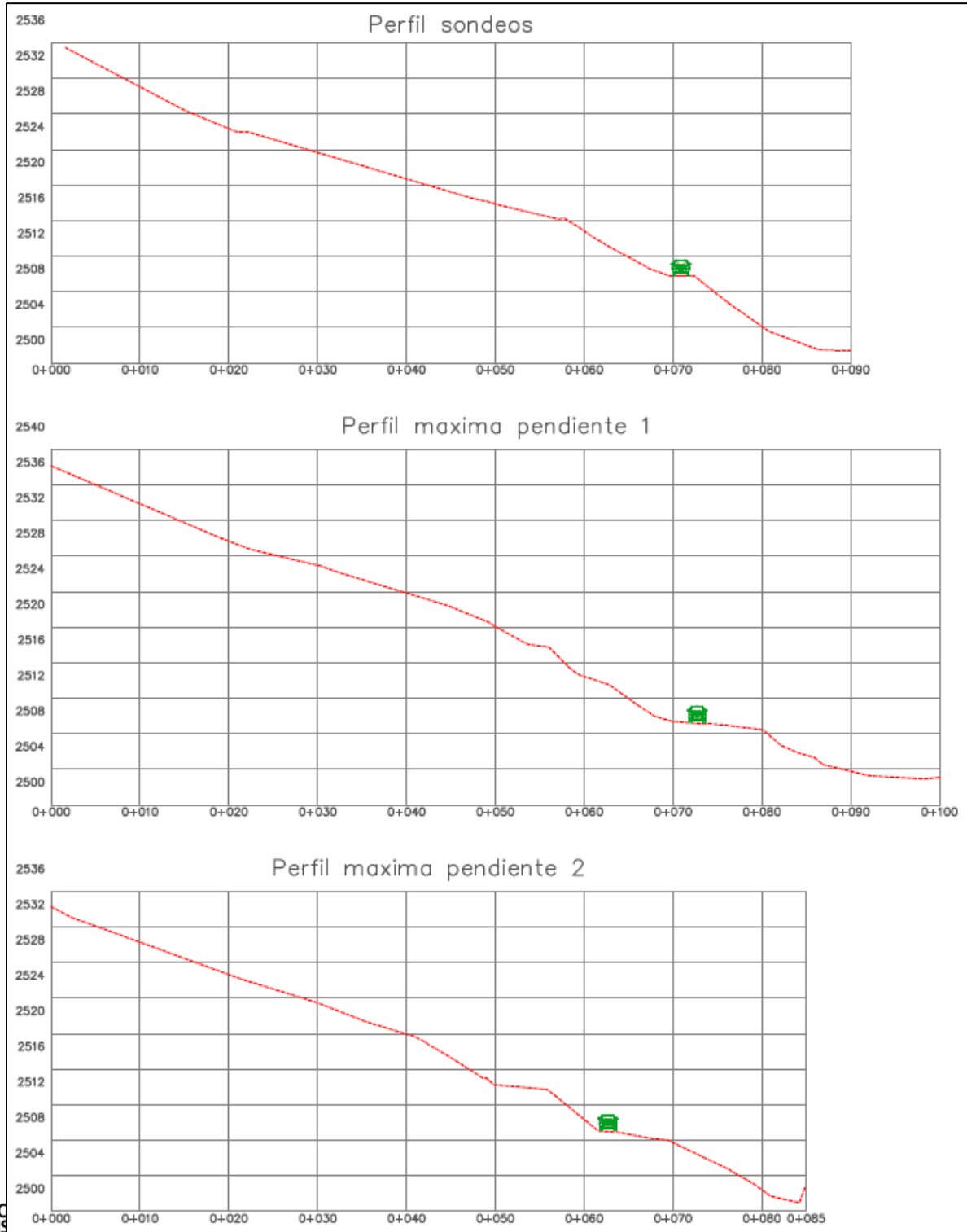
Tabla 17

Datos de Precipitación Mensual Estación Pila la Finca

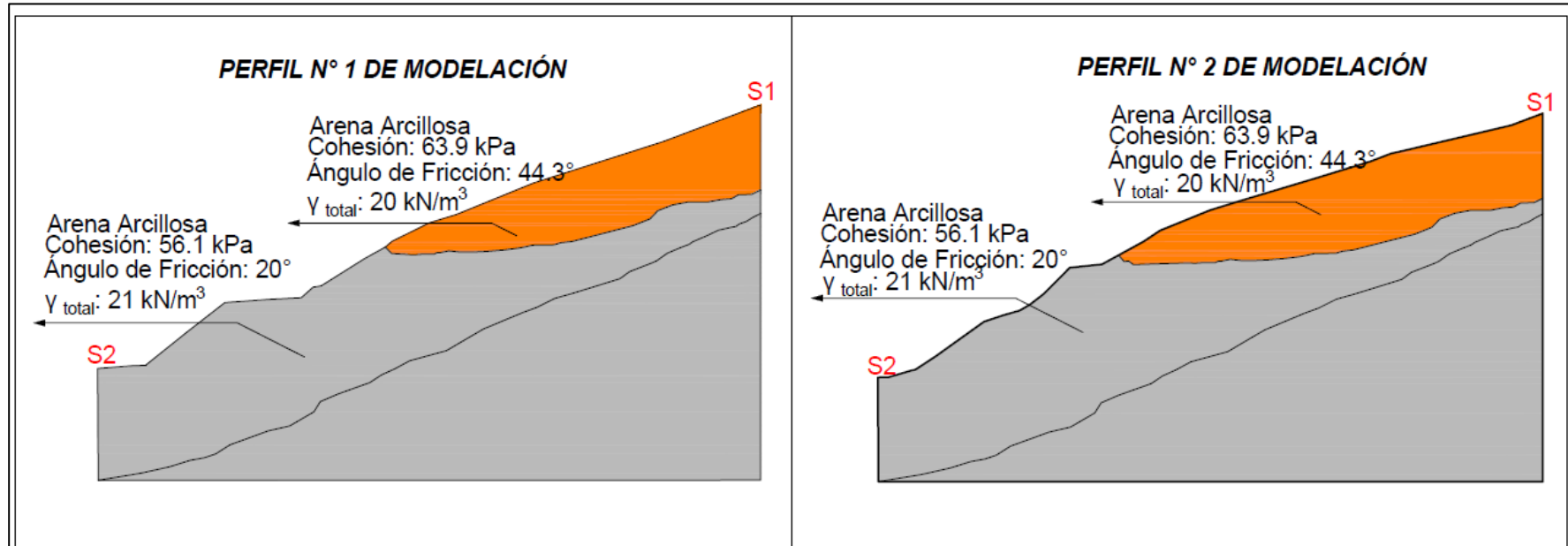
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2013	0	317	336	467	1297	329	787	727	274	1041	552	23	6150
2014	87	29	425	501	699	528	321	169	234	48	658	573	4272
2015	383	399	543	455	209	844	548	311	32	345	185	106	4360
2016	38	0	305	1299	733	314	1171	552	689	649	852	387	6989
2017	79	20	1136	213	1548	193	557	305	272	32	175	151	4681
2018	168	0	632	1206	1153	523	882	419	381	84	706	0	6154
2019	46	68	881	724	105	602	462	658	378	318	995	49	5286
2020	141	84	267	77	247	992	912	258	30	597	1049	447	5101
2021	63	69	1256	663	1456	150	663	468	275	1285	0	11	6359
2022	94	609	1371	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2074



SECCIONES DE ANÁLISIS



PERFILES GEOTÉCNICOS PARA MODELACIÓN



1. A partir del perfil realizado con los sondeos, se llevó a cabo una interpolación para las secciones de máxima pendiente donde se contemplaron los mismos materiales
2. Después de las profundidades exploradas, se asumió que el material es el mismo, esto para poder realizar el proceso de modelación de la mejor manera.
3. Las variables usadas para la modelación corresponden a las halladas a través de la investigación en laboratorio.
4. Las secciones objeto de análisis, están determinadas por los sondeos ejecutados (S1 y S2)

	<p>Nombre del Proyecto</p> <p>ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD BAJO CONDICIONES CRÍTICAS DE HUMEDAD.</p>	<p>Ubicación</p> <p>País: Colombia Departamento: Boyacá Municipio: Viracachá</p>	<p>Sistema de Coordenadas</p> <p>Proyección: Transversal_Mercator Zona: 18N Bogotá_Utm_Zone_18N</p>	<h1>Plano 9</h1>
--	---	---	--	------------------



ANEXOS II

RESULTADOS DE

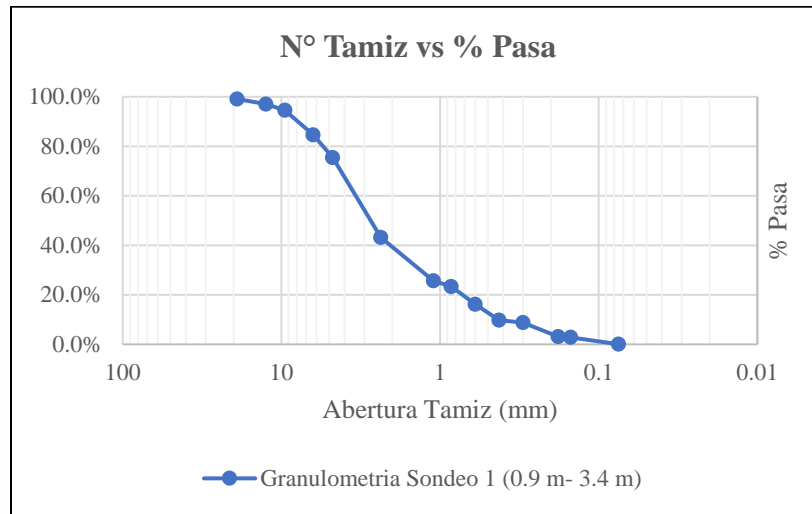
LABORATORIO



CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LA EXPLORACIÓN

Figura 50

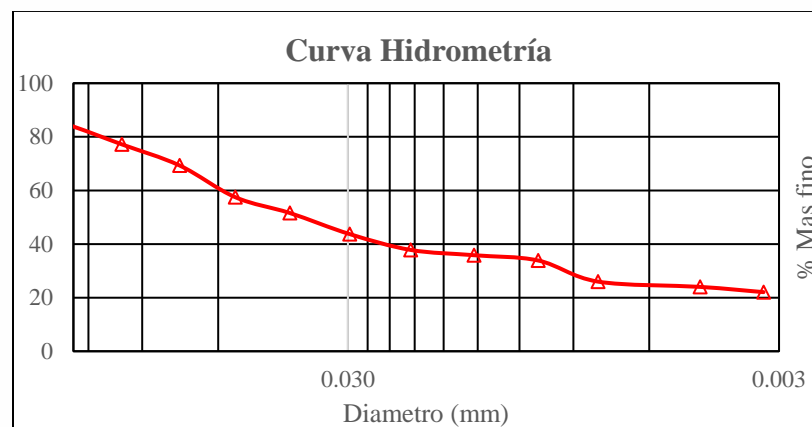
Curva Granulométrica Sondeo 1- Estrato 1



Nota: La Figura muestra la distribución de los tamaños para las partículas de suelo encontradas en el primer estrato del sondeo 1.

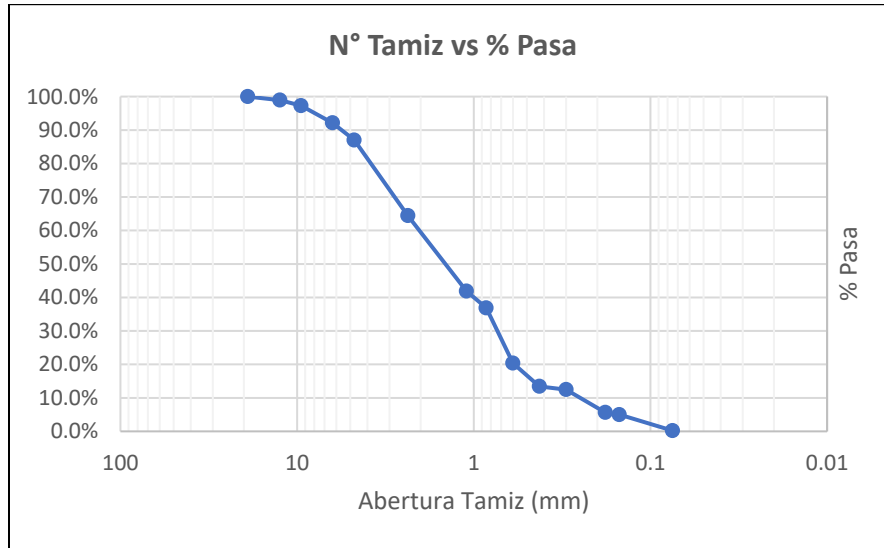
Figura 51

Curva Hidrometría Sondeo 1- Estrato 1



Nota: Se muestra el tamaño de las partículas de material que pasan el Tamiz N° 200, correspondiente al estrato 1

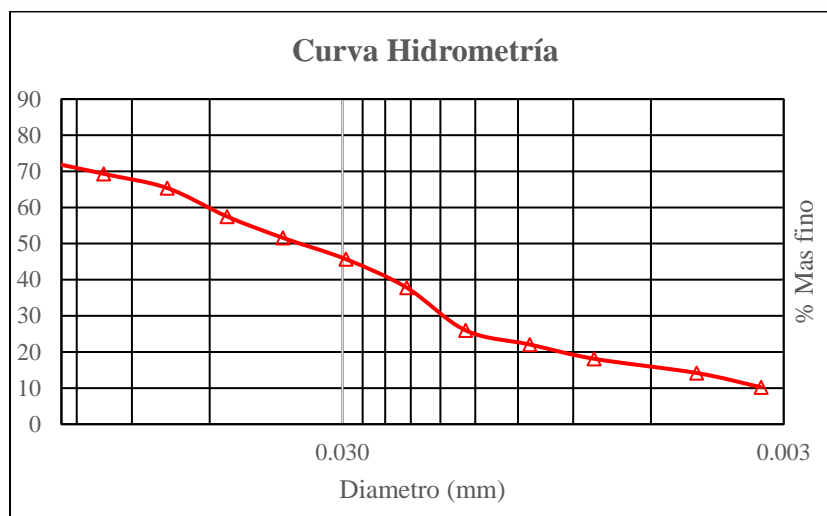
Curva Granulométrica Sondeo 1- Estrato 2



Nota: La Figura muestra la distribución de los tamaños para las partículas de suelo encontradas en el primer estrato del sondeo 1.

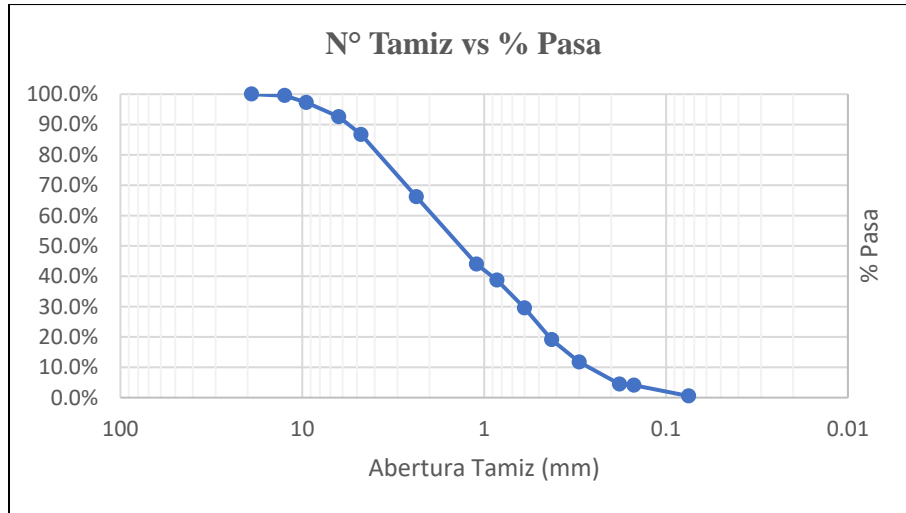
Figura 53

Curva Hidrometría Sondeo 1- Estrato 2



Nota: Se muestra el tamaño de las partículas de material que pasan el Tamiz N° 200, correspondiente al estrato 2.

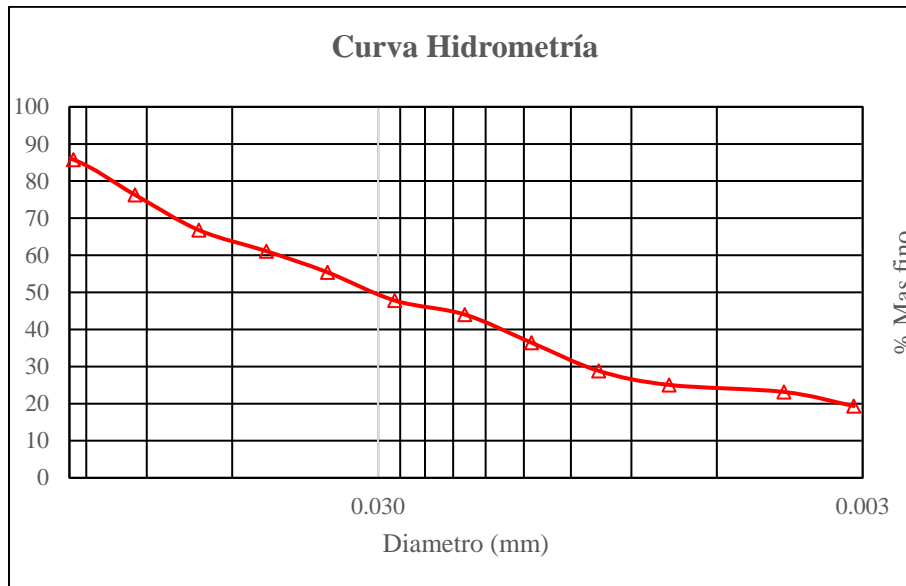
Curva Granulométrica Sondeo 2-Estrato 1



Nota: Para el sondeo 2 se encontró una misma distribución de tamaños para los ensayos de granulometría ejecutados.

Figura 55

Curva Hidrometría Sondeo 2- Estrato 1



Nota: La curva granulométrica para el sondeo 2 corresponde a la encontrada para una adecuada, extraída a lo largo de la exploración.