

PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD UBICADO EN EL K2+250 DE  
LA VÍA (PUERTO RICO) QUE COMUNICA LOS MUNICIPIOS DE TOLEDO Y  
LABATECA DEL DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

HENRY LIZCANO BAUTISTA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN GEOTECNIA  
BUCARAMANGA

2023

PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD UBICADO EN EL K2+250 DE  
LA VÍA (PUERTO RICO) QUE COMUNICA LOS MUNICIPIOS DE TOLEDO Y  
LABATECA DEL DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

HENRY LIZCANO BAUTISTA

Trabajo de grado para optar el título de  
MAGÍSTER EN GEOTECNIA

Director

WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ

Ing. Msc Suelos y Geotecnia

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN GEOTECNIA  
BUCARAMANGA

2023

## NOTA DE PROYECTO DE GRADO

## AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UIS

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios todo poderoso, por guiarme y protegerme en este proceso. A mi mamá, pues ella es mi apoyo, quien veló por mi bienestar y educación, ella es la voz que me da la fortaleza para seguir adelante en cada paso que doy y gracias a ella, ser la persona que soy hoy en día.

A ti madre, te dedico este trabajo que con mucho esmero y trabajo me he ganado.

## AGRADECIMIENTOS

Primero, dedicó esto a la universidad industrial de Santander por recibirme en este proceso de mi maestría y a todo el personal docente que fue parte de esta etapa de conocimiento y aprendizaje.

Segundo, agradezco a mi asesor de tesis Wilfredo del Toro por haberme brindado sus conocimientos y aprendizajes, también por su apoyo para salir adelante con este proyecto.

Tercero, agradezco a todas las personas que fueron parte de mi proceso aconsejándome y dándome apoyo en los buenos y malos momentos.

A todos ellos, gracias

## TABLA DE CONTENIDO

1INTRODUCCIÓN .....	18
2PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
3JUSTIFICACIÓN.....	23
4OBJETIVOS.....	24
4.1OBJETIVO GENERAL .....	25
4.2OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
5MARCO TEÓRICO .....	25
5.1ORIGEN Y FORMACIÓN DEL SUELO .....	26
5.1.1Suelos residuales .....	26
5.1.2Suelos transportados .....	26
5.2PROCESOS DE REMOCIÓN Y MOVIMIENTOS EN MASA .....	27
5.2.1Factores causales de movimientos en masa .....	27
5.2.2TIPOS DE MOVIMIENTOS EN MASA.....	29
6ESTABILIZACIÓN DE TALUDES .....	33
6.1Tipos de taludes.....	34
6.1.1Taludes naturales .....	34
6.1.2Taludes construidos.....	36
6.2Parámetros de estabilidad de taludes.....	37
6.2.1Resistencia al corte.....	37
6.2.2Ángulo de fricción ( $\varphi$ ) .....	38
6.2.3Cohesión.....	38
6.2.4Presiones de poros .....	38
6.2.5Envolvente de falla .....	39

6.2.6Análisis de límite de equilibrio.....	40
6.2.7Factor de seguridad.....	40
6.2.8Superficie de falla .....	41
6.2.9Parámetros utilizados en los análisis de límite de equilibrio .....	43
6.3Métodos para el análisis de estabilidad de taludes.....	44
6.3.1Métodos de dovelas.....	46
7OBRAS DE MITIGACIÓN CONSIDERADAS.....	47
7.1Sistema de terrazas y bermas .....	47
7.2Sistema de anclajes.....	48
7.3Sistema de drenaje .....	50
7.4Revegetalización.....	51
8SOFTWARE ESPECIALIZADO PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES: SLIDE .....	51
9METODOLOGÍA .....	53
9.1Caracterización general de la vía (Puerto Rico) en el sector en estudio.....	54
9.2Descripción geológica de la zona de estudio .....	54
9.3Caracterización climática de la zona de estudio .....	55
9.4Levantamiento topográfico de la zona de estudio.....	55
9.5Exploración geotécnica .....	59
9.5.1Sondeos geotécnicos.....	59
9.5.2Ensayos geofísicos .....	60
9.5.3Ensayos de laboratorio .....	60
9.6Análisis De Estabilidad Del Talud Mediante El Software Slide Especializado En Geotecnia .....	61

9.6.1.Diseño de las obras de mitigación a nivel geotécnico según la norma NSR-10	61
9.7Cálculo del presupuesto y programación de las obras de mitigación seleccionadas en los diseños	62
10CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	63
10.1CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	65
10.1.1Estratigrafía	65
10.1.2Geología Estructural	68
10.1.3Geomorfología	69
10.1.4Procesos Morfodinámicos	71
10.2SISMICIDAD	72
10.3CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	75
10.3.1Precipitación	75
10.3.2Temperatura	79
11LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	80
12EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	82
12.1Sondeos geotécnicos	82
12.2Ensayos geofísicos	84
12.3ENSAYOS DE LABORATORIO Y CAMPO	99
12.3.1Ensayos De Campo	99
12.3.2Ensayos De Laboratorio	100
13CARACTERIZACIÓN Y MODELO GEOTÉCNICO DEL TALUD EN ESTUDIO	101
13.1CONDICIONES DE PERFIL INICIAL DE TALUD	101

13.1.1	Caracterización estratigráfica de la zona .....	102
14	DISEÑO DE OBRAS DE MITIGACIÓN .....	104
15	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD-CONDICIÓN ACTUAL .....	108
15.1	PERFIL DE ANÁLISIS NO.1 .....	108
15.2	PERFIL DE ANÁLISIS NO.2 .....	110
15.3	PERFIL DE ANÁLISIS NO.3 .....	112
16	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – PROPUESTA OBRAS DE MITIGACIÓN .....	114
16.1	PERFIL DE ANÁLISIS NO.1 .....	114
16.2	PERFIL DE ANÁLISIS NO.2 .....	116
16.3	PERFIL DE ANÁLISIS NO.3 .....	118
17	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES .....	119
18	PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN ....	120
18.1	Memoria de cálculos de obra .....	121
18.2	Presupuesto de obra de mitigación.....	121
18.3	Diagrama de Grant Programación .....	123
18.4	Flujo De Fondos.....	124
18.5	Cuadro de Actividades de Precedencia y Tiempos.....	126
18.6	Resumen De La Programación.....	127
18.7	Cantidad de Insumos .....	128
19	CONCLUSIONES .....	129
20	BIBLIOGRAFÍA .....	131

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de factores causales de movimientos de remoción en masa .....	27
Tabla 2. Respuestas geodinámicas de laderas, de acuerdo con su forma.....	35
Tabla 3. Factores de seguridad Básicos Mínimos Directos .....	41
Tabla 4. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	45
Tabla 5. Información de los puntos auxiliares o de referencia.....	58
Tabla 6. Detalles y abreviaturas utilizadas en el levantamiento topográfico .....	59
Tabla 7. Valores de $A_a$ , $A_v$ , $A_e$ y $A_d$ y definición de la zona de amenaza de los municipios de Toledo y Labateca, Norte de Santander .....	74
Tabla 8. Valores de $K_{ST}/a_{max}$ Mínimos para Análisis Pseudoestático de Taludes .....	74
Tabla 9. Información estación Labateca .....	75
Tabla 10. Intensidades máximas para diferentes periodos de retorno .....	78
Tabla 11. Apiques realizados en la zona de estudio.....	82
Tabla 12. Sondeos mecánicos realizados en el sitio crítico.....	82
Tabla 13 Resumen localización líneas de refracción sísmica.....	84
Tabla 14. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS11. ....	88
Tabla 15. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS12. ....	91
Tabla 16. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS13. ....	95
Tabla 17. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS14. ....	98
Tabla 18 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.1108	
Tabla 19 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.2110	
Tabla 20 Factores de seguridad condición actual.....	111
Tabla 21 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.3112	
Tabla 22 Factores de seguridad condición actual.....	113
Tabla 23 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.1114	

Tabla 24 Factores de seguridad condición con obras. ....	115
Tabla 25 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.2116	
Tabla 26 Factores de seguridad condición con obras. ....	117
Tabla 27 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.3118	
Tabla 28 Factores de seguridad condición con obras .....	119
Tabla 29 Presupuesto De Obra de Mitigación .....	121
Tabla 30 Diagrama de Grant Programación .....	123
Tabla 31 Flujo De Fondos .....	124
Tabla 32 Actividades de Precedencia y Tiempos .....	126
Tabla 33 Resumen De La Programación.....	127

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localización general-Talud vía Puerto Rico .....	20
Figura 2 Estado actual del talud en estudio.....	22
Figura 3. Esquema de un proceso de reptación .....	30
Figura 4. Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento .....	31
Figura 5. Deslizamiento traslacional .....	32
Figura 6. Deslizamiento rotacional en una ladera.....	33
Figura 7. Partes generales de un talud o ladera .....	34
Figura 8. Ladera natural .....	35
Figura 9. Talud artificial (corte o relleno) .....	36
Figura 10. Representación gráfica de la ecuación de Coulomb .....	37
Figura 11. Representación de la presión de poros .....	39
Figura 12. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante.....	42
Figura 13. Formas de la superficie de falla .....	43
Figura 14. Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas ....	47
Figura 15. Esquema de un anclaje tipo .....	48
Figura 16. Tipos de anclajes.....	50
Figura 17. Metodología para la investigación y el análisis de deslizamientos ...	53

Figura 18. Reconocimiento en campo-Topografía.....	56
Figura 19. GPS Submétrico RTX STONEX S800.....	57
Figura 20. Localización puntos auxiliares o de referencia .....	58
Figura 21. Localización talud en estudio.....	64
Figura 22. Mapa geológico regional y localización del talud en estudio .....	66
Figura 23. Geología estructural regional.....	68
Figura 24. Unidades geomorfológicas de origen aluvial .....	70
Figura 25. Unidad de loma en la zona de estudio.....	71
Figura 26. Deslizamientos en el talud de estudio .....	72
Figura 27. Amenaza sísmica en la zona de estudio .....	73
Figura 28. Precipitaciones totales-Estación Labateca .....	76
Figura 29. Coeficiente pluviométrico-Estación Labateca .....	77
Figura 30. Curvas IDF-Estación Labateca.....	79
Figura 31. Localización de los puntos del levantamiento topográfico .....	80
Figura 32. Levantamiento topográfico en el talud de estudio .....	81
Figura 33 Perfil estratégico.....	83
Figura 34 Imagen satelital con la ubicación de las líneas de refracción sísmica LRS14, LRS13, LRS12 y LRS11. ....	84
Figura 35. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 11. ....	85
Figura 36. Tomografía 2D obtenida de la LRS 11. ....	86
Figura 37. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS11.....	87
Figura 38. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 12. ....	89
<i>Figura 39. Tomografía 2D obtenida de la LRS 12. ....</i>	<i>90</i>
Figura 40. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS12.....	91
Figura 41. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 13. ....	92
Figura 42. Tomografía 2D obtenida de la LRS 13. ....	93
Figura 43. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS13.....	94

Figura 44. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 14. ....	96
Figura 45. Tomografía 2D obtenida de la LRS 14. ....	97
Figura 46. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS14.....	98
Figura 47 Condiciones iniciales de talud, perfil de análisis (Perfil 3) .....	102
Figura 48 Estrato de depósito Residual.....	102
Figura 49 Estrato de areniscas.....	103
Figura 50 Estrato Arcillolitas .....	103
Figura 51 Condiciones iniciales de talud, perfil de análisis (Perfil 3) .....	104
Figura 52. Diseño de anclajes .....	106
Figura 53. Diseño de cunetas.....	107
Figura 54 Factor de seguridad condición estática actual perfil No.1.....	108
Figura 55 Factor de seguridad condición pseudoestática actual perfil No.1....	109
Figura 56 Factor de seguridad condición estática actual perfil No.2.....	110
Figura 57 Factor de seguridad condición pseudoestática actual perfil No.2....	111
Figura 58 Factor de seguridad condición estática actual perfil No.3.....	112
Figura 59 Factor de seguridad condición pseudoestática actual perfil No.3....	113
Figura 60 Factor de seguridad condición estática con obras perfil No.1 .....	114
Figura 61 Factor de seguridad condición pseudoestática con obras perfil No.1 .....	115
Figura 62 Factor de seguridad condición estática con obras perfil No.2 .....	116
Figura 63 Factor de seguridad condición pseudoestática con obras perfil No.2 .....	117
Figura 64 Factor de seguridad condición estática con obras perfil No.3 .....	118
Figura 65 Factor de seguridad condición pseudoestática con obras perfil No.3 .....	119
Figura 66 Cantidad De Insumos .....	128

## LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A.** Levantamiento topográfico
- ANEXO B.** Exploración geotécnica
- ANEXO C.** Ensayos de laboratorio
- ANEXO D.** Análisis de estabilidad del talud en SLIDE
- ANEXO E.** Diseño de anclajes activos
- ANEXO F.** Planos De Diseño Obras De Mitigación
- ANEXO G.** Presupuesto De Propuesta De Mitigación.

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN DEL TALUD UBICADO EN EL K2+250 DE LA VÍA (PUERTO RICO) QUE COMUNICA LOS MUNICIPIOS DE TOLEDO Y LABATECA DEL DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER

**AUTOR:** HENRY LIZCANO BAUTISTA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Talud, Estabilidad, Software Slide, Mitigación, Caracterización.

**DESCRIPCIÓN:** El presente trabajo de aplicación comprende la caracterización y análisis de estabilidad del talud inferior y superior, localizado en el K3+000 de la vía que comunica los municipios de Toledo y Labateca, desde un enfoque geológico y geotécnico. Por medio del software Slide y en cumplimiento de los factores de seguridad expuestos en la Norma NSR 10, se plantean alternativas para la estabilización del talud por medio de la modelación geotécnica y el diseño óptimo de obras hidráulicas adecuadas de acuerdo a las condiciones geológicas, geomorfológicas, geotécnicas del talud, así como las propiedades físicas y mecánicas del suelo como sistema de terrazas, implementación de zanjas y cunetas para sistema de drenaje, uso de anclajes y pernos, y finalmente incorporación de Biomantos para el revegetalización.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. MSc. Wilfredo del Toro Rodríguez.

## ABSTRACT

**TITLE:** PROPOSED STABILIZATION OF THE SLOPE LOCATED IN THE K2+250 OF THE VIA (PUERTO RICO) THAT COMMUNICATES THE MUNICIPALITIES OF TOLEDO AND LABATECA, DEPARTMENT OF NORTH OF SANTANDER

**AUTHOR:** HENRY LIZCANO BAUTISTA\*\*

**KEYWORDS:** Slope, Stability, Software Slide, Mitigation, Characterization.

**DESCRIPTION:** This application work includes the characterization and stability analysis of the lower and upper slope, located at K3+000 of the road that connects the municipalities of Toledo and Labateca, from a geological and geotechnical approach. Through the Slide software and in compliance with the safety factors set forth in the NSR 10 Standard, alternatives are proposed for the stabilization of the slope through geotechnical modeling and the optimal design of adequate hydraulic works according to the geological, geomorphological conditions. , geotechnics of the slope, as well as the physical and mechanical properties of the soil as a terrace system, implementation of ditches and ditches for the drainage system, use of anchors and bolts, and finally incorporation of Biomats for revegetation.

---

\* Degree work

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. MSc. Wilfredo del Toro Rodríguez.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las fuertes olas invernales ocurridas bajo la influencia de los fenómenos asociados al cambio climático han afectado la infraestructura vial de Colombia y principalmente las zonas de relieve montañoso del oriente colombiano. Al respecto, las entidades Nacionales y Departamentales encargadas de mantener las vías en buen estado han visto la necesidad de realizar programas de inversión en vías terciarias, para intervenir las zonas donde se ha presentado procesos de remoción en masa, puesto que la comunicación entre los municipios ha sido afectada social y económicamente. De igual forma, se hace necesaria la formulación e implementación de Planes de Gestión del Riesgo Municipales con la finalidad de prevenir, mitigar y corregir los impactos derivados de los procesos de remoción en masa, principalmente, los deslizamientos.

En este sentido, el área de la geotecnia perteneciente a la rama de la Ingeniería Civil permite aplicar conocimientos en geología, mecánica de suelos, comportamiento de las propiedades del suelo por medio de software especializados para analizar casos complejos como la estabilización de taludes de una manera dinámica y empleando diversas metodologías. De la misma forma, la integración de otras disciplinas de la ingeniería se convierte en una herramienta de gran utilidad para el planteamiento de soluciones viables a nivel técnico y económico, con la finalidad de garantizar obras de alta calidad y con los diseños óptimos.

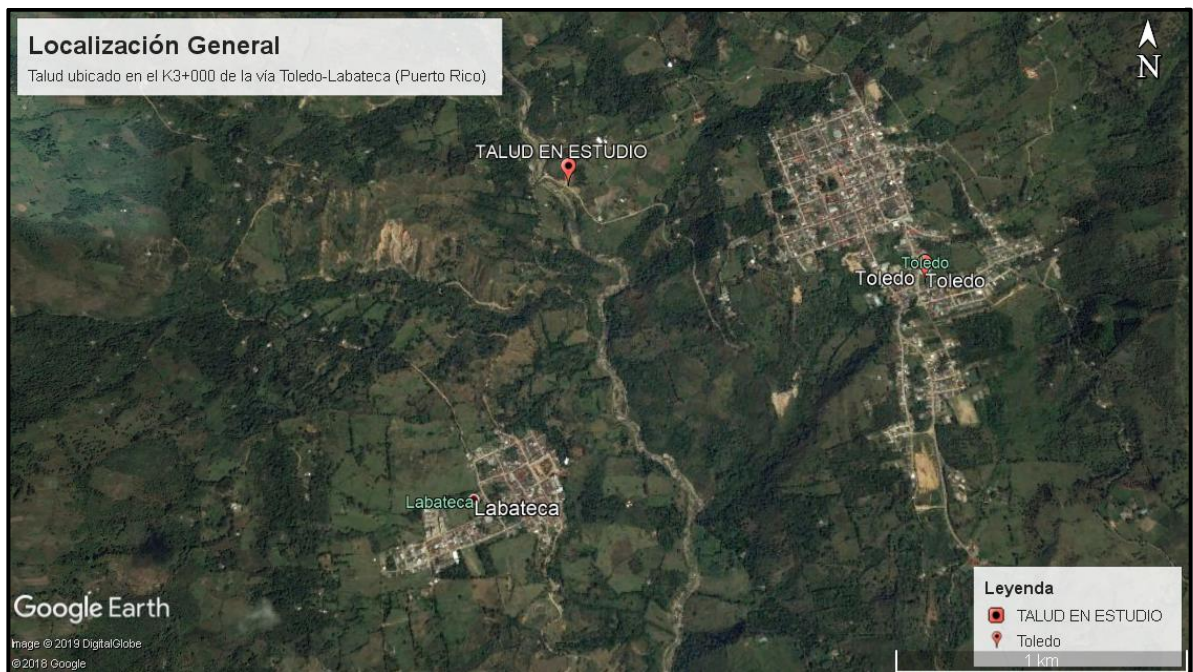
La estructura del presente documento se establece a partir de los capítulos que se refieren a continuación. En primera instancia, se detallan los aspectos generales entorno al planteamiento del problema, justificación y objetivos, que permitieron argumentar la finalidad, la solución que se quiere proponer y el impacto que se genera con el desarrollo del presente trabajo. Seguidamente, se relaciona el marco teórico que permitió fundamentar y orientar la investigación hacia el planteamiento

de la solución más efectiva. Luego, se describe la metodología que se estructuró para el desarrollo del trabajo. Más adelante, se revelan los resultados de la caracterización de la zona de estudio, que correspondió a los aspectos generales como localización, aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos, sísmicos, resultados del levantamiento topográfico y exploración geotécnica (perforaciones, exploración geofísica, ensayos de laboratorio). Posteriormente, se presenta la modelación de los resultados obtenidos de la caracterización de la zona de estudio (vía Puerto Rico) en el software Slide desarrollado por Rocscience, especializado en geotecnia. Después, se puntualizan los diseños, así como el cálculo del costo y programación de las obras de ingeniería necesarias para estabilizar el talud en estudio, de acuerdo a los resultados obtenidos previamente. Finalmente, se revelan las conclusiones y recomendaciones, que reflejan los aportes más relevantes; de igual forma, se relaciona la bibliografía que sustenta el trabajo y se indican los principales anexos o documentos de soporte.

## 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A finales del año 2010 y principios del 2011 en el territorio colombiano se presentó el fenómeno de la niña (asociado al cambio climático), una fuerte ola invernal que dejó zonas inundadas, deslizamientos y deterioro de las vías a nivel Nacional, Departamental y Municipal según lo reporta Euscátegui y Hurtado (2011). El departamento Norte de Santander no fue ajeno a esta problemática, pues en el caso específico de la vía entre los municipios de Toledo y Labateca, en el sitio denominado Puerto Rico a orillas del río Culagá (Figura 1), al aumentar el caudal por las altas precipitaciones, el río empezó a socavar el talud que conforma el borde de la vía, lo que ocasionó la pérdida total de la banca, incrementando el índice de riesgo para la zona (PDM Toledo, 2012).

*Figura 1 Localización general-Talud vía Puerto Rico*



*Fuente: Elaboración propia*

En el año 2011, los municipios estuvieron incomunicados por dos meses con el sur de Norte de Santander, situación que afectó el sector económico y social de las poblaciones de Toledo y Labateca. Respecto a esto, las autoridades Nacionales, Departamentales y Municipales no dieron respuesta a la problemática, conllevando a que la colonia toledana residente en Cúcuta y el Comité Cívico de Toledo realizaran una protesta pacífica ante la Gobernación del Departamento Norte de Santander. De la misma forma, el gremio de transportadores de los municipios ha solicitado en varias ocasiones a las alcaldías municipales y la Gobernación de Norte de Santander pronta solución a la problemática, dado que se reflejó en los gastos operacionales (combustibles, deterioro de los vehículos, demoras y accidentes) de los vehículos de transporte de carga y de pasajeros, por tener que realizar rutas más extensas y transitar por vías alternas en malas condiciones, en los periodos de tiempo que la vía (Puerto Rico) queda incomunicada por el deslizamiento del talud ubicado en el K2+250.

Teniendo en cuenta lo anterior, la comunidad de los municipios decidió intervenir el sitio de los deslizamientos con el objeto de construir nuevamente la banca de la vía, utilizando herramientas básicas y sin estudios de diseños previos, pues al no tener repuesta por parte de las entidades gubernamentales resolvieron dar solución a la problemática por cuenta propia.

En este sentido, el EOT del municipio de Toledo (2001), plantea que el deterioro de las vías es un factor determinante dentro de la problemática ambiental municipal por los riesgos que se presentan a lo largo de ellas debido a la falta de obras hidráulicas apropiadas, mantenimiento de su área de rodamiento y por falta de pavimentación y protección de su área de influencia. Lo anterior se ve reflejado en el mal estado de la vía causado por deslizamientos y falta de drenaje, que ha generado áreas de alta susceptibilidad al deterioro, e iniciados procesos de remoción en masa que atentan contra la población, el ecosistema y el recurso hídrico (represamientos). En la actualidad, la capa de rodadura de la vía se encuentra deteriorada, principalmente

en el sitio denominado Puerto Rico, dado que cada vez que se presentan altas precipitaciones se originan deslizamientos incomunicando por largos periodos de tiempo a los municipios (Figura 2).

*Figura 2 Estado actual del talud en estudio*



*Fuente: Elaboración propia*

De acuerdo con lo anteriormente descrito, se hace necesario realizar un control y proponer opciones viables de solución a la problemática que ha venido afectando la calidad de vida de los habitantes de los municipios de Toledo y Labateca en los últimos años a nivel socioeconómico y ambiental.

### 3 JUSTIFICACIÓN

La vía que comunica los municipios de Toledo y Labateca se clasifica como secundaria (PDM Toledo, 2012), lo que la ubica en el medio de comunicación más cercano y de movilidad para el transporte y comercio de productos entre estas localidades. Según lo anterior, la vía comparte un enlace vital para el flujo de transporte de vehículos y comercialización entre las municipalidades (Toledo-Labateca) que posibilita el desarrollo económico y progreso en la región.

En el municipio de Toledo se encuentra la infraestructura energética e hidroeléctrica más importante del Oriente Colombiano, correspondiente a 76 km de tubería de Ecopetrol S.A, 68 km de tubería de gasoducto Transoriente trayecto Gibraltar – Bucaramanga y el pozo de crudo Magallanes (ANH, 2014); industria que abastece a Santander, Norte Santander, Arauca y el sur de Cesar. También se encuentra en marcha la hidroeléctrica del Margua que proveerá de energía eléctrica a Santander, Norte de Santander, Arauca y Estado Apure (Venezuela). En tal sentido, para poder desarrollar la industria con calidad y eficiencia es necesario contar con vías adecuadas, seguras y que puedan ser transitadas permanentemente sin interferencias ni pérdida de tiempo y así establecer el progreso de esta región Norte Santandereana.

De acuerdo con lo anterior, los motivos de los estudios y diseños de la estabilización del talud ubicado en el K2+250 de la vía (Puerto Rico) que comunica los municipios de Toledo y Labateca es principalmente garantizar la calidad de vida de los habitantes del sector en los aspectos socioeconómico y de igual manera, analizar la amenaza por procesos de remoción en masa en esta zona, mitigando los impactos generados por los deslizamientos ocurridos en el talud mediante la modelación geotécnica y el diseño óptimo de obras hidráulicas que cumplan con su funcionamiento.

Los resultados obtenidos de la presente investigación proporcionarán las herramientas necesarias para que las entidades municipales y autoridades ambientales competentes realicen una correcta planificación y evaluación del ordenamiento territorial respecto a la gestión del riesgo en la zona.

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer el diseño de obras de mitigación que intervengan el movimiento de tierra del talud ubicado en el K 2+250 de la vía (puerto rico) que comunica los municipios de Toledo y Labateca del departamento Norte de Santander.

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la vía (Puerto Rico) en el sector en estudio en los aspectos geológicos, geotécnicos, geomorfológicos, climáticos y topográficos.
- Interpretar los datos obtenidos en la caracterización de la vía (Puerto Rico) mediante el software Slide, especializado en geotecnia.
- Realizar el análisis de estabilización del talud a nivel geotécnico según la norma NSR 2010 en condiciones estáticas y pseudoestáticas, siguiendo los parámetros obtenidos del análisis de datos.
- Calcular el presupuesto y programación de las obras de mitigación seleccionadas en los diseños.

## **5 MARCO TEÓRICO**

En este apartado se incluyen los conceptos y teorías que fundamentaron el presente trabajo, correspondientes al origen y formación del suelo, los procesos y tipos de movimientos en masa, estabilización de taludes y software especializado (Slide) que permiten orientar a obtener la solución más efectiva frente a la problemática planteada.

### **5.1 ORIGEN Y FORMACIÓN DEL SUELO**

#### **5.1.1 Suelos residuales**

Un suelo residual se forma a partir de la acción del intemperismo químico o físico de la roca sana. Con la alteración progresiva de las propiedades geomecánicas de la roca, las capas más superficiales se van transformando en suelo. El suelo residual se caracteriza por estar siempre sobreyaciendo a la roca que le dio origen y puede alcanzar espesores de decenas de metros (Gerscovich, 2015).

#### **5.1.2 Suelos transportados**

Estos depósitos se originan por transporte de los materiales, que tiene como agente principal la acción de la gravedad; se acumulan en la base o a distancia pequeña de los taludes muy empinados o escarpes rocosos. En la mayoría de los casos es muy difícil identificar en campo la transición entre un depósito coluvial (suelo transportado) y el suelo residual, debido a que la acción del intemperismo tiende a destruir las diferencias geológicas entre ellos, llevando a una capa visualmente homogénea (Gerscovich, 2015).

## 5.2 PROCESOS DE REMOCIÓN Y MOVIMIENTOS EN MASA

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (2017), el movimiento en masa equivale a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa o fallas de taludes y laderas. Según lo anterior, los movimientos en masa incluyen todos aquellos movimientos ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad.

La caracterización y descripción de la amenaza por movimientos en masa debe incluir su ubicación, clasificación, geometría, magnitud o intensidad, y se evalúa en términos de frecuencia de ocurrencia. La magnitud se suele expresar cuantitativamente como una media del tamaño del evento (volumen o área) y la intensidad (relacionada con el potencial destructivo del evento) con parámetros cualitativos o cuantitativos como velocidad máxima del evento, desplazamiento total, desplazamiento diferencial, profundidad, descarga pico por unidad de ancho o energía cinética por unidad de área (SGC, 2017).

### 5.2.1 Factores causales de movimientos en masa

Los factores causales de movimientos en masa pueden ser agrupados de acuerdo con las temáticas involucradas según lo expresa el SGC (2017). En la Tabla 1 se presenta la lista de factores causales de los movimientos en masa.

*Tabla 1. Lista de factores causales de movimientos de remoción en masa*

- **CONDICIONES GEOLÓGICAS**

<b>MATERIALES PLÁSTICOS DÉBILES</b>
<b>MATERIALES SENSITIVOS</b>
<b>MATERIALES COLAPSABLES</b>
<b>MATERIALES METEORIZADOS</b>
<b>MATERIALES CIZALLADOS</b>
<b>MATERIALES FISURADOS O DIACLASADOS</b>

**DISCONTINUIDADES EN MACIZOS O MASAS DE SUELO ORIENTADAS EN LA MISMA DIRECCIÓN DE LA LADERA**

**DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES**

**CONTRASTE EN PERMEABILIDADES Y DE RIGIDEZ**

- **CONDICIONES GEOMORFOLÓGICAS**

**LEVANTAMIENTO TECTÓNICO**

**LEVANTAMIENTO VOLCÁNICO**

**REBOTE GLACIAL**

**EROSIÓN FLUVIAL DE LA BASE DEL TALUD**

**EROSIÓN COSTERA DE LADERAS**

**EROSIÓN GLACIAL DE LADERAS**

**EROSIÓN DE MÁRGENES LATERALES**

**EROSIÓN SUBTERRÁNEA**

**DEPÓSITOS DE MATERIAL TRANSPORTADO EN LA BASE O CRESTA DE LA LADERA**

**REMOCIÓN DE VEGETACIÓN**

- **PROCESOS FÍSICOS**

**PERIODOS DE LLUVIA INTENSOS**

**DERRETIMIENTO SÚBITO DE HIELO**

**PRECIPITACIÓN PROLONGADA**

**DESCENSO DE NIVELES DE INUNDACIÓN O MAREAS ALTAS**

**SISMOS**

**ERUPCIONES VOLCÁNICAS**

**CONTRACCIÓN Y EXPANSIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS**

- **PROCESOS ANTRÓPICOS**

**EXCAVACIÓN DE LADERAS**

**IMPOSICIÓN DE CARGAS EN EL BORDE DE LADERAS**

**DESOCUPAR RESERVORIOS**

**IRRIGACIÓN DE LADERAS**

**SISTEMAS DE DRENAJE DEFECTUOSOS**

**DEFORESTACIÓN**

**MINERÍA**

**RELLENOS NO TÉCNICOS**

**VIBRACIÓN ARTIFICIAL**

*Fuente: Elaboración propia a partir de SGC (2017)*

## 5.2.2 TIPOS DE MOVIMIENTOS EN MASA

### 5.2.2.1 *Flujos*

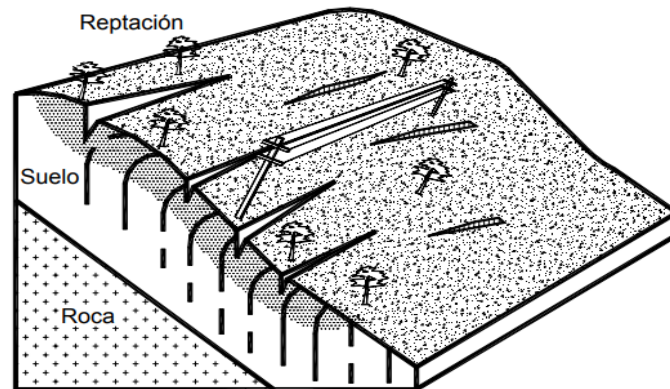
Los flujos son movimientos continuos, con superficie de deslizamiento definida o sin ella, ni asociados con una velocidad específica. Cuando el movimiento es muy lento recibe el nombre de reptación y cuando es rápido se denomina flujo de lodos. En general, los flujos presentan un mecanismo de deformación semejante al movimiento de un fluido viscoso.

### 5.2.2.2 *Reptación*

La reptación es un tipo de flujo extremadamente lento de suelos, con movimiento continuo, sin superficie de rotura bien definida, que puede abarcar grandes áreas, sin que haya una diferenciación clara entre la masa en movimiento y la que permanece estable (Figura 3). Las causas del movimiento se atribuyen a la acción de la gravedad asociada con efectos de la variación de la humedad y la temperatura.

El movimiento ocurre en un estado de esfuerzos inferior a la resistencia al corte del suelo o roca. En superficie puede identificarse la reptación por la observación de desplazamientos de ejes de carreteras, bloques rocosos, postes o cercas, o inclinación de árboles, postes, etc (Gerscovich, 2015).

Figura 3. Esquema de un proceso de reptación



Fuente: Suarez (2009)

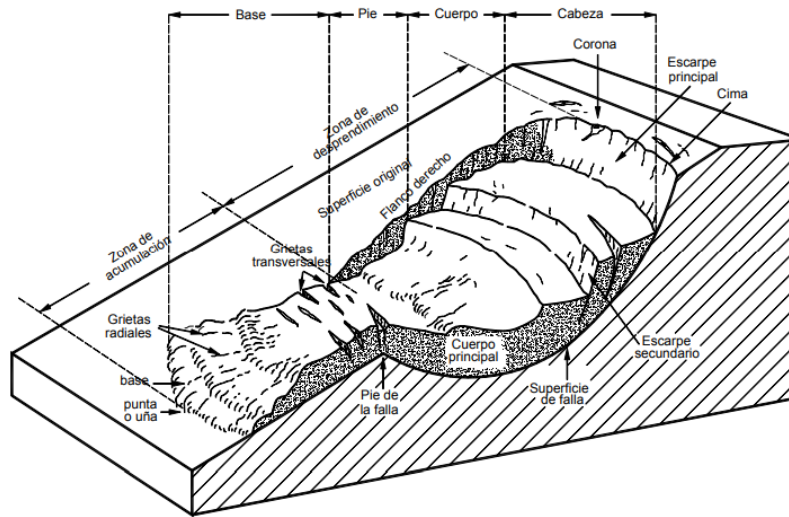
### 5.2.2.3 Caída

Las caídas son movimientos bruscos con velocidad alta, que abarcan bloques rocosos que se desplazan en caída libre o a lo largo de un plano inclinado. El desprendimiento de los bloques se origina por la acción de la meteorización en las fracturas, presiones hidrostáticas en estas, pérdida de confinamiento lateral, corrientes de agua subterránea, vibraciones, entre otros (Gerscovich, 2015).

### 5.2.2.4 Deslizamiento

Los deslizamientos son movimientos en masa rápidos, con superficie de rotura bien definida, que ocurren cuando los esfuerzos de corte movilizados en la masa del suelo igualan o superan la resistencia al corte del material. Tanto en suelos como en rocas, la rotura tiene lugar por la superficie que presenta la menor resistencia. De acuerdo con las condiciones geomorfológicas, las superficies de rotura pueden ser planares, circulares, en cuña, o en una combinación de formas (circular y planar) denominadas superficies mixtas. Los elementos y partes que caracterizan un deslizamiento se muestran en la Figura 4.

Figura 4. Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento

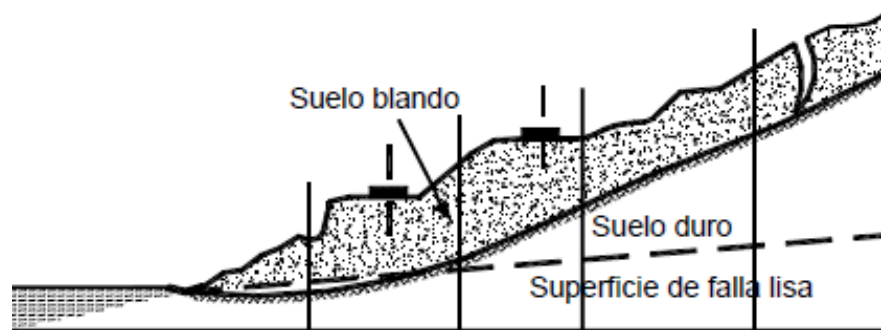


Fuente: Suarez (2009)

- **Deslizamientos traslacionales**

Se caracterizan por tener discontinuidades o planos de debilidad. Este tipo de deslizamiento es muy común en mantos coluviales de poco espesor que sobreyacen a un basamento rocoso (Figura 5). Cuando los planos de debilidad se cruzan o cuando las capas de menor resistencia no son paralelas a la superficie del talud, la superficie de rotura puede presentar la forma de cuña delimitada por dos o más planos.

Figura 5. Deslizamiento traslacional

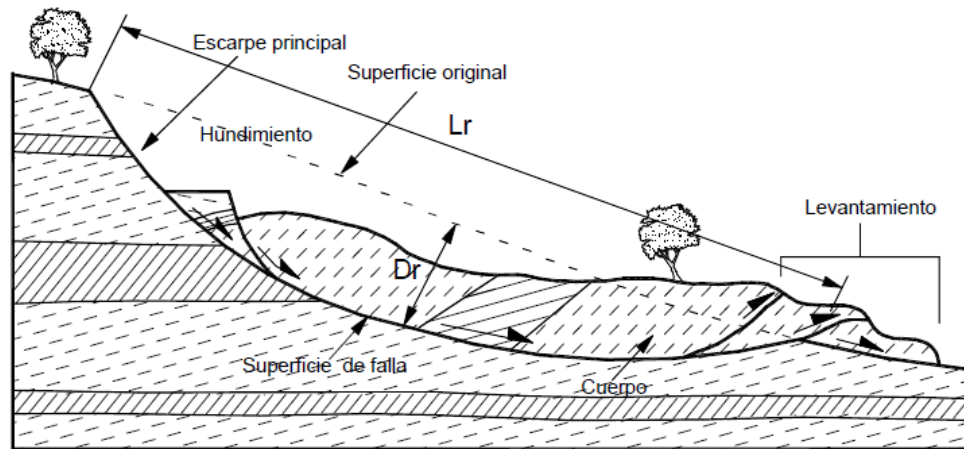


Fuente: Suarez (2009)

- **Deslizamientos rotacionales**

En suelos relativamente homogéneos, la superficie de rotura tiende a ser circular y corresponde a un deslizamiento rotacional (Figura 6). Los deslizamientos rotacionales se denominan múltiples cuando desarrollan más de una superficie de rotura. Cuando los mecanismos de falla evolucionan a lo largo del tiempo en dirección de la cresta del talud (ladera arriba), se denominan retrogresivos (Gerscovich, 2015).

Figura 6. Deslizamiento rotacional en una ladera



Fuente: Suarez (2009)

- **Deslizamientos mixtos**

Los deslizamientos de forma mixta ocurren cuando hay una heterogeneidad en el talud caracterizada por la existencia de materiales o discontinuidades con resistencias más bajas (Gerscovich, 2015).

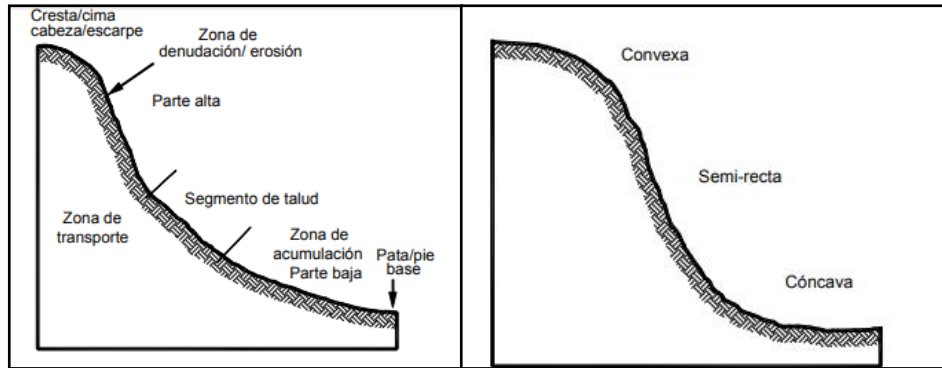
## 6 ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

Según Gerscovich (2015), talud es la denominación que se da a cualquier superficie inclinada de suelo o de un macizo rocoso. Puede ser natural, también llamado ladera, o construido por el hombre, como en los cortes y terraplenes. Para Suarez (2009), un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura.

El talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de denudación o erosión; una parte intermedia semirecta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, pata o base, en

la cual ocurren principalmente los procesos de depositación (Figura 7) (Suarez, 2009).

Figura 7. Partes generales de un talud o ladera



Fuente: Suarez (2009)

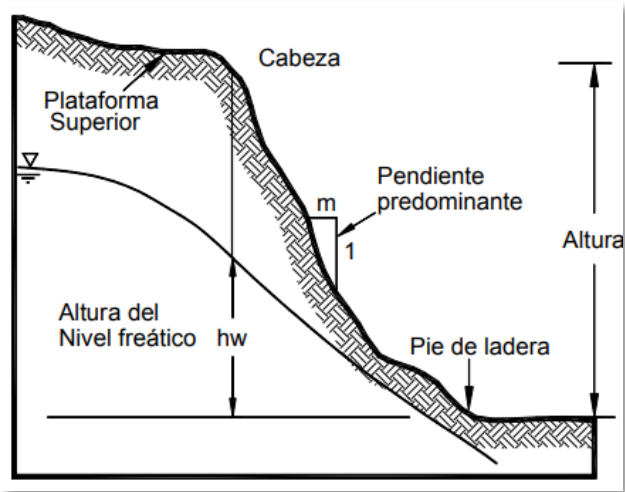
## 6.1 Tipos de taludes

Los taludes se pueden agrupar en dos categorías generales: los terraplenes y los cortes de laderas naturales. Se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

### 6.1.1 Taludes naturales

Los taludes naturales o laderas pueden estar constituidos por suelo residual, coluviones o roca. Los suelos residuales permanecen en el sitio en que fueron formados por meteorización de las rocas, en tanto que los coluviones son el resultado de transporte de suelos y rocas por acción de la gravedad. Los taludes naturales están siempre sometidos a problemas de inestabilidad, porque las acciones de las fuerzas gravitacionales contribuyen naturalmente a disparar el movimiento (Gerscovich, 2015). En la Figura 8 se muestra la representación de una ladera o talud natural.






Figura 8. Ladera natural



Fuente: Suarez (2009)

En lo relacionado con la forma, los taludes pueden presentar cara plana o curvilínea y puede ser cóncava o convexa, generando así las condiciones de flujo preferenciales del agua superficial, según se expresa en la Tabla 2.

Tabla 2. Respuestas geodinámicas de laderas, de acuerdo con su forma

Tipo de Talud	Superficie	Condición de la ladera en relación con el agua superficial
	Plana	
	Convexa	Colectora
		Difusora
	Cóncava	Colectora
		Difusora

Fuente: Elaboración propia a partir de Troeh (1965) y (Gerscovich, 2015).

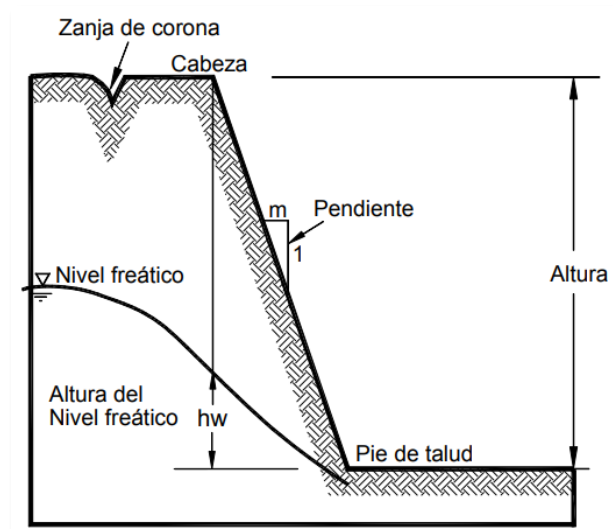
Como lo expresa Gerscovich (2015), la inestabilidad de taludes es consecuencia de la propia dinámica de evolución de estos. A medida que avanzan los procesos físico-químicos de alteración (meteorización) de las rocas, el material resultante se va volviendo menos resistente, y dependiendo de la influencia de la topografía se generan condiciones propicias para disparar rotura del talud.

### 6.1.2 Taludes construidos

Los taludes construidos por la acción humana resultan de cortes en laderas u otras excavaciones y de la construcción de terraplenes (Figura 9).

Los terraplenes se construyen en proyectos de presa de tierra, en obras viales, en la implantación de obras civiles cuando el suelo de fundación tiene baja capacidad de soporte o para la nivelación del terreno. Como se conocen las propiedades geotécnicas del suelo compactado que se utiliza en dichas obras, los cálculos de estabilidad afrontan menos problemas comparados con los de suelos naturales según lo menciona Gerscovich (2015).

Figura 9. Talud artificial (corte o relleno)



Fuente: Suarez (2009)

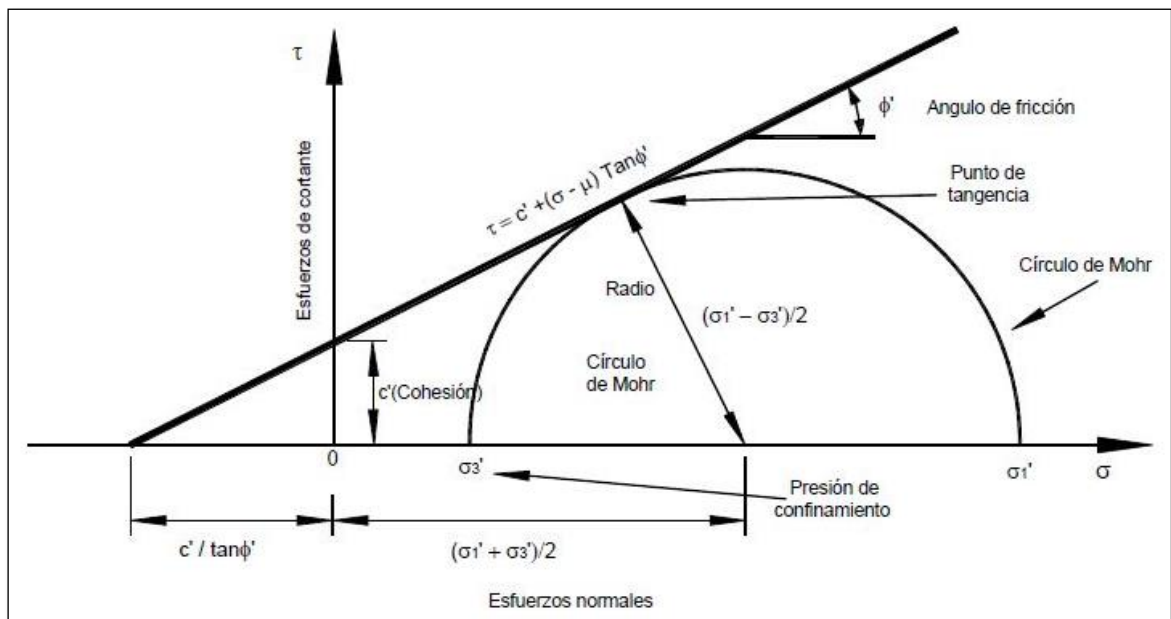
En los análisis de estabilidad deben considerarse diferentes momentos de la obra: al final de la construcción, cuando se ha generado un exceso positivo de la presión de poros, y al largo plazo, cuando se alcanza un equilibrio hidráulico (Gerscovich, 2015).

## 6.2 Parámetros de estabilidad de taludes

### 6.2.1 Resistencia al corte

Los suelos son capaces de resistir esfuerzos cortantes debido a la movilización de resistencia en el contacto entre granos, así como por la interferencia que el arreglo estructural impone cuando se promueve un desplazamiento relativo entre partículas. Según lo anterior, la resistencia al corte de los suelos es función de dos componentes: resistencia entre partículas y entrelazamiento (Gerscovich, 2015). En la Figura 10 se muestra la gráfica de la ecuación de Coulomb, que representa o ilustra la resistencia al corte en los suelos.

Figura 10. Representación gráfica de la ecuación de Coulomb



Fuente: Suarez (2009)

Los valores del coeficiente de fricción y cohesión varían con los siguientes factores:

- Las condiciones de drenaje.
- La velocidad del ensayo.
- La dirección de ensayo (suelo anisotrópico).
- La trayectoria de esfuerzos.
- La densidad o compacidad de la muestra.

### **6.2.2 Ángulo de fricción ( $\varphi$ )**

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento. En suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo. Todos los suelos poseen fricción; sin embargo, a los suelos arcillosos con fricción muy baja o despreciable, se les denomina suelos cohesivos, es decir,  $\varphi = 0$ . El ángulo de fricción depende del tipo de suelo, su densidad, distribución de los tamaños de granos o partículas, permeabilidad, presión normal o de confinamiento, entre otros (Suarez, 2009).

### **6.2.3 Cohesión**

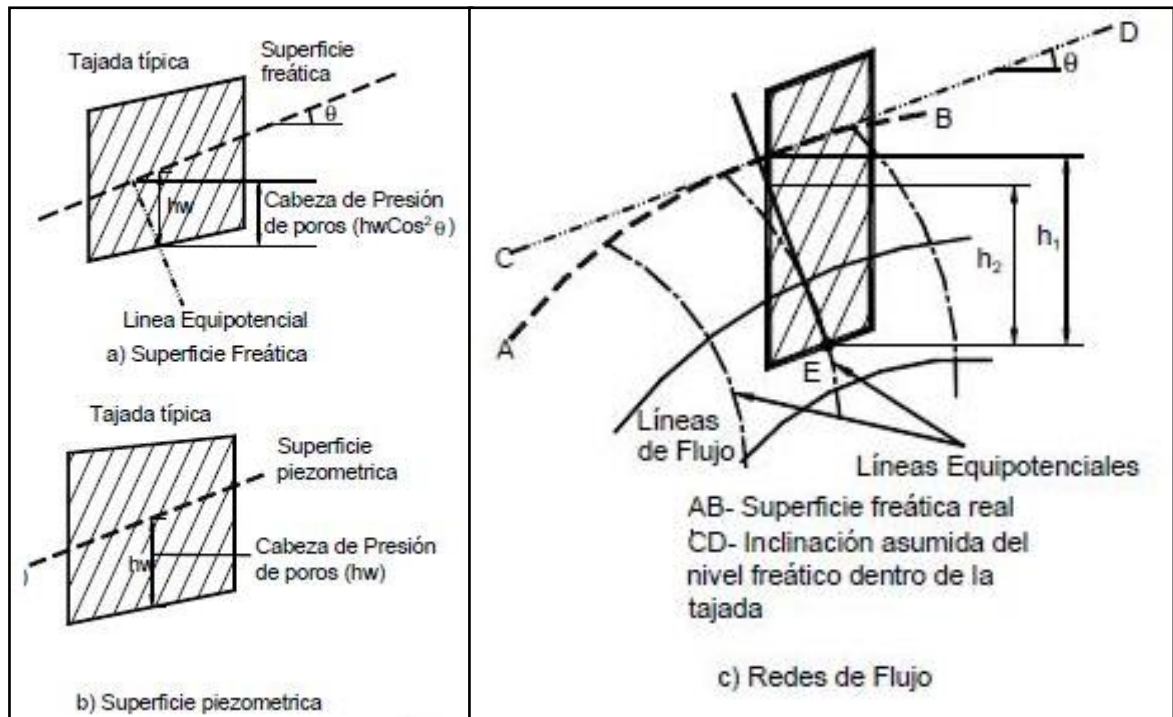
La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. En mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas. En los suelos granulares en los cuales no existe ningún tipo de material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina “no cohesivos” (Suarez, 2009).

### **6.2.4 Presiones de poros**

Las condiciones de presión de poros son generalmente obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando los métodos de superficie freática, datos piezométricos, relación de

presión de poros, superficie piezométrica y presión de poros constante (Suárez, 2009). En la Figura 11 se muestra la representación de la presión de poros en un talud.

Figura 11. Representación de la presión de poros



Fuente: Suarez (2009)

### 6.2.5 Envoltente de falla

La falla es un estado de fuerzas arbitrario, definido por la curva esfuerzo-deformación, que varía según el criterio que se adopte. Según Gerscovich (2015), independientemente del criterio de falla adoptado, se trabaja con el concepto de envoltente de rotura (o de resistencia), que define el lugar geométrico de los estados de esfuerzo para la condición de falla.

El círculo de Mohr se emplea para representar o describir la resistencia al cortante de los suelos, utilizando la envoltente de falla Mohr-Coulomb, lo cual equivale a que

ha alcanzado la combinación crítica de los esfuerzos a la falla. Los puntos de la envolvente de falla corresponden a los esfuerzos que producen falla al cortante. Los esfuerzos por encima de la envolvente de falla no pueden existir (Suarez, 2009).

### 6.2.6 Análisis de límite de equilibrio

Como lo expresa Suarez (2009), un análisis de límite de equilibrio permite obtener a través de un factor de seguridad o un análisis regresivo, los valores de la resistencia al cortante en el momento de una falla. Luego de determinarse las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o el deslizamiento.

### 6.2.7 Factor de seguridad

El factor de seguridad es empleado para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña (Suarez, 2009). El autor Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S = \frac{\textit{Resistencia al cortante disponible}}{\textit{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

Existen, además, otros sistemas para plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud, métodos probabilísticos, así como tablas empíricas locales basadas en el comportamiento típico de los taludes (Suarez, 2009).

Según la NSR (2010), la selección de los factores de seguridad debe justificarse plenamente teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La magnitud de la obra.
- Las consecuencias de una posible falla en la edificación o sus cimentaciones.
- La calidad de la información disponible en materia de suelo.

Los Factores de Seguridad Básicos  $F_{SB}$  aplicados al material terreo (suelo, roca o material intermedio) no deben ser inferiores a los Factores de Seguridad Básicos Mínimos  $F_{SBM}$  o  $F_{SBUM}$ . En la Tabla 3 se indican los factores de seguridad básicos mínimos directos, teniendo en cuenta las fases de diseño y construcción de las obras, así como la condición de los taludes. Las cargas se refieren a valores nominales sin coeficiente de mayoración.

Tabla 3. Factores de seguridad Básicos Mínimos Directos

Condición	$F_{SBM}$		$F_{SBUM}$	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
<b>Carga Muerta + Carga viva Normal</b>	1.50	1.25	1.80	1.40
<b>Carga Muerta + Carga Viva Máxima</b>	1.25	1.10	1.40	1.15
<b>Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático</b>	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
<b>Taludes - Condición Estática y Agua Subterránea Normal</b>	1.50	1.25	1.80	1.40
<b>Taludes - Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño</b>	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

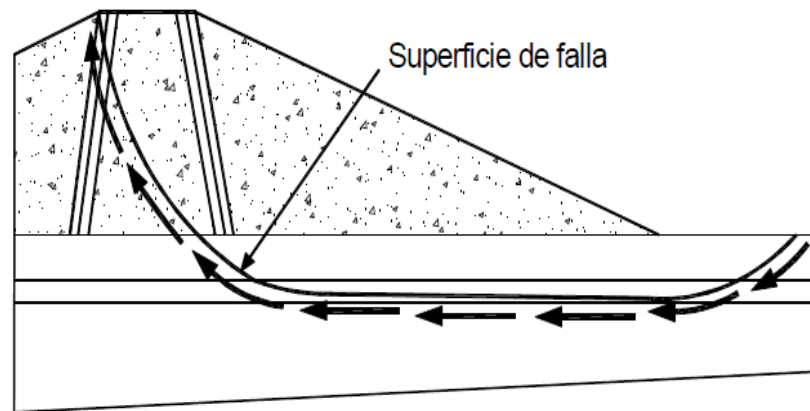
(\*) Nota: Los parámetros sísmicos Seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

Fuente: NSR (2010)

## 6.2.8 Superficie de falla

El termino superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud (Figura 12); sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente.

*Figura 12. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante*

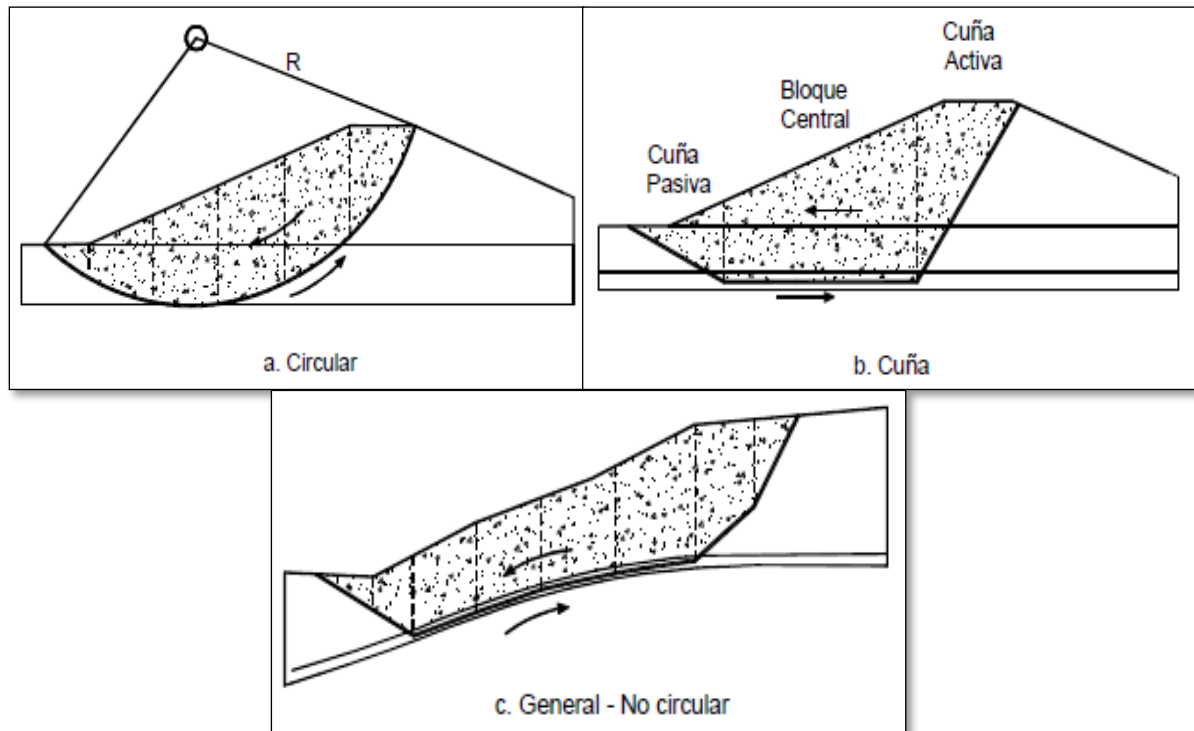


*Fuente: Suarez (2009)*

En los métodos de límite de equilibrio el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serian iguales en todos los puntos a lo largo de la superficie de falla (Suarez, 2009).

Las técnicas de límite de equilibrio se utilizan cuando las fallas corresponden a los deslizamientos de traslación o rotación sobre superficies de falla determinadas, como se indica en la Figura 13. Se pueden analizar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de estas.

Figura 13. Formas de la superficie de falla



Fuente: Suarez (2009)

### 6.2.9 Parámetros utilizados en los análisis de límite de equilibrio

Los modelos tienen en cuenta los factores primarios que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de los sismos, flujos de agua, propiedades de resistencia y peso unitario de los suelos, entre otros según lo indica Suarez (2009).

- Pesos Unitarios: Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático, y saturados por debajo de este nivel.
- Resistencia al cortante: La resistencia al cortante que se va a utilizar en los análisis, puede ser medida por métodos de laboratorio o de campo. Se

debe tener en cuenta si se trata de condiciones drenadas o no drenadas o si el análisis es realizado en estado no-saturado.

- Condiciones drenadas o no drenadas: Las fallas de los taludes pueden ocurrir en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es causada por los cambios en la carga, como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior estos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En este caso se dice que las condiciones son no drenadas.
- Esfuerzos totales y efectivos: Los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. Siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo está regida por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada.
- Estabilidad a corto y a largo plazo: En la estabilidad a corto plazo debe tenerse en cuenta que los suelos que no tienen un drenaje rápido, están sujetos a presiones de poros por acción de las cargas aplicadas. En la estabilidad a largo plazo, se supone que los suelos están drenados.

### **6.3 Métodos para el análisis de estabilidad de taludes**

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de límite de equilibrio, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros. Los factores que generan el deslizamiento pueden ser complejos y muy difíciles de modelar; no obstante, con el objeto de analizar esas situaciones complejas, existen algunas herramientas utilizando elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos y modelos dinámicos. De la misma forma, se pueden integrar al análisis modelaciones de hidrogeología y las solicitaciones sísmicas (Suarez, 2009).

En la Tabla 4 se manifiestan algunos de los métodos más utilizados para el análisis de estabilidad de taludes, así como sus principales características.

Tabla 4. Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Método	Superficie de falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varia con el ángulo de rotación
Arco circular (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Circulo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. se requiere que el suelo sea cohesivo ( $\varphi = 0$ )
Ordinario o de Fellenius (Fellenius, 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas
Bishop simplificado (Bishop, 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero
Janbú Simplificado (Janbú, 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas
Sueco Modificado. U.S Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las Fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de fuerzas laterales son las mismas para

			cada tajada, pero son desconocidas
Morgenstern & Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla

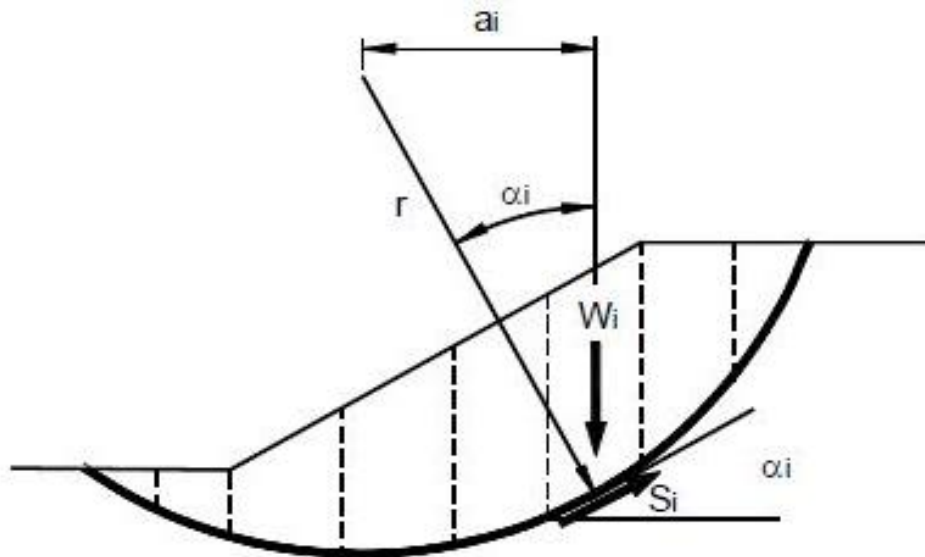
*Fuente: Elaboración propia a partir de Suarez (2009).*

### 6.3.1 Métodos de dovelas

Se emplea en la mayoría de los métodos con fallas curvas o circulares, donde la masa de la parte superior de la superficie de falla se divide en una serie de tajadas o dovelas verticales (Figura 14).

El método de las tajadas es la forma más utilizada en estabilidad, pues no presenta restricciones en cuanto a homogeneidad del suelo, geometría del talud y tipo de análisis; así, este método permite que el suelo sea heterogéneo, que el talud presente superficie irregular y, principalmente posibilita incluir la distribución de presión de poros. Además, puede hacerse el análisis en la condición más crítica: al final de la construcción o a largo plazo (Gerscovich, 2015). El número de dovelas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis. Entre mayor sea el número de dovelas, se supone que los resultados serán más precisos (Suarez, 2009).

Figura 14. Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas



Fuente: Suarez (2009)

Entre los diversos métodos que utilizan dovelas se encuentran el método Ordinario o de Fellenius, el método simplificado de Bishop, y otros métodos más precisos como los de Morgenstern & Price y Spencer, que utilizan una función para calcular las fuerzas entre dovelas (Suarez, 2009).

## 7 OBRAS DE MITIGACIÓN CONSIDERADAS

### 7.1 Sistema de terrazas y bermas

Los propósitos de los sistemas de terrazas son varios, uno de ellos el cual se considera el más común y requerido, es controlar la erosión al reducir la pérdida de suelo y la retención de sedimentos en las fincas. En segundo lugar, el propósito de las terrazas es mejorar las condiciones de humedad del suelo, y obtendremos diferentes efectos según la pendiente y la forma de las terrazas. Las terrazas se utilizan en zonas semiáridas del planeta donde la erosión hídrica y eólica presentan

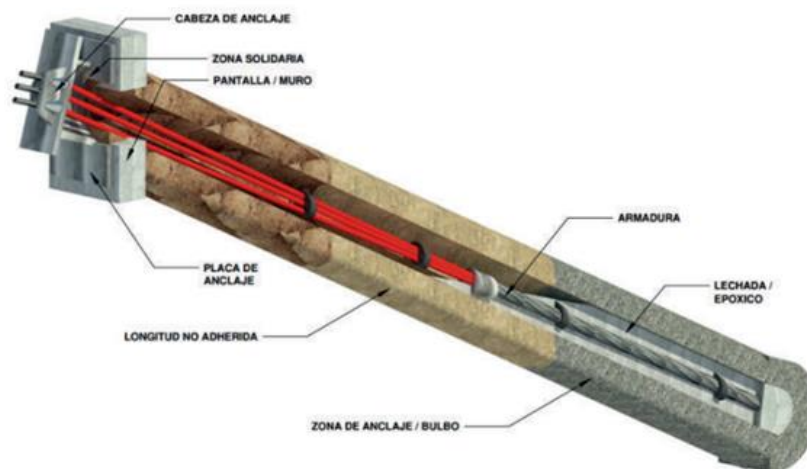
pocos problemas, y en zonas con precipitaciones moderadas a muy altas donde el drenaje superficial es fundamental.

## 7.2 Sistema de anclajes

Un ancla para suelo o roca es un elemento estructural esbelto, diseñado para transmitir un esfuerzo de tensión al terreno circundante. Se emplea para estabilizar y soportar estructuras de tierra, naturales o artificiales, sometidas a fuerzas laterales o de levantamientos importantes, con lo cual se restringe el desplazamiento y/o giro. Para proporcionar la estabilidad requerida el ancla debe ser llevada a una zona firme de suelo o roca.

Con base en la descripción anterior, un ancla puede ser: un pilote a tensión, un muro de concreto, un bloque de gravedad o cualquier otro elemento especial a tensión embebido en el suelo, en posición vertical, horizontal o inclinada. A pesar de la gran variedad de elementos que pueden desempeñar la función de anclaje, el tipo más común y técnicamente más avanzado, consiste en un tendón de acero instalado dentro de un barreno con cierta inclinación, profundidad y fijado firmemente en el suelo por medio de un cementante.

*Figura 15. Esquema de un anclaje tipo*



*Fuente: Toxement, Guía de taludes*

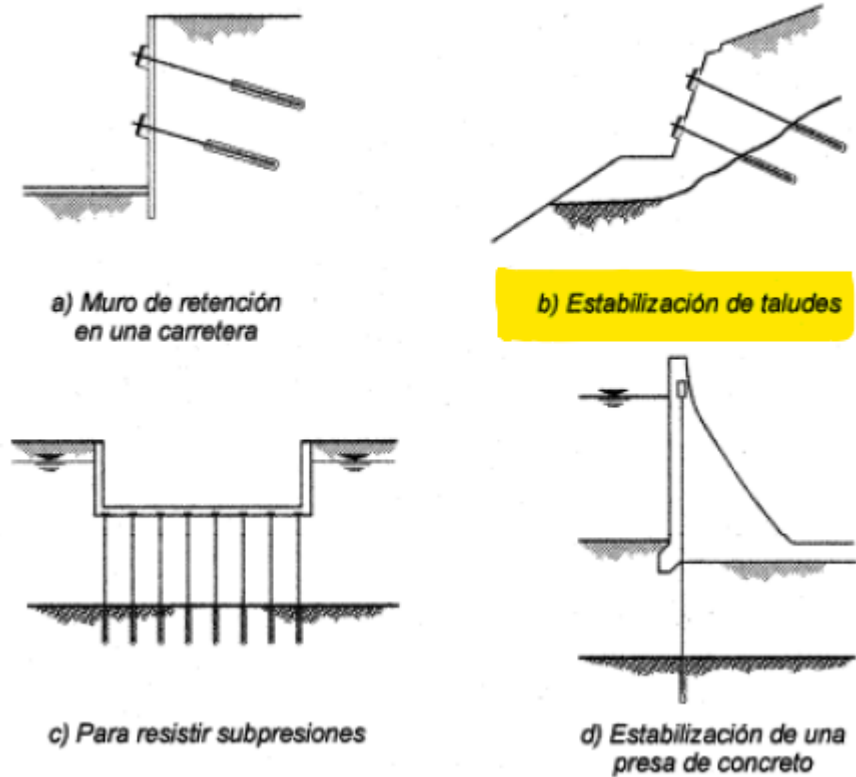
Existen muchas similitudes entre las anclas para suelo y para roca (las de suelo se desarrollaron a partir de estas últimas). El principio de funcionamiento en ambos casos es el mismo, transmitir una fuerza de tensión a un punto fuera de la masa de material por estabilizar. Sin embargo, las anclas para suelo, por ser éste un material “blando”, son de baja a mediana capacidad y el barreno o dispositivo de anclaje es común que se ensanche en su parte final. Además, la capacidad del ancla se ve influida por la profundidad de colocación. Las anclas en roca, por el contrario, son de mediana a muy alta capacidad, ya que este material resiste concentraciones de esfuerzo mayores. El barreno suele tener una sección constante. La resistencia al corte se ve influida en menor medida por la profundidad de anclaje.

El anclaje puede ser activo o pasivo, según se indique o no, la aplicación de una carga de tensionamiento al final de la construcción.

Los **anclajes activos** generalmente se construyen con cable torón (1/2” o 5/8”) en profundidades superiores a 12m, con zona de bulbo inyectada a presión y cargas de tensionamiento superiores a 30ton. Sus principales aplicaciones incluyen estabilización de deslizamientos de alto volumen, muros y pantallas de contención, estabilización de excavaciones, estabilización de taludes en presas y control de levantamiento o falla de fondo.

Los **anclajes pasivos o pernos** se construyen generalmente con barra roscada o corrugada en profundidades inferiores a 12m y llenados con lechada a baja presión (en ocasiones incluso por gravedad). Su aplicación incluye deslizamientos potenciales de bajo volumen, control de falla de fondo y control de caídas en taludes rocosos acompañados de malla triple torsión.

Figura 16. Tipos de anclajes



Fuente: Suarez (2009)

### 7.3 Sistema de drenaje

Los taludes en suelos cohesivos saturados se pueden estabilizar implementando sistemas de drenaje con el objetivo de reducir la presión intersticial a lo largo de la cara de flujo, efectiva o potencialmente, aumentando así la resistencia al corte del suelo.

- Subdrenes y cunetas

El drenaje de penetración lateral horizontal forma un sistema de drenaje subterráneo que consiste en la introducción de tuberías ranuradas que se encaminan hacia el talud cortado lateralmente y finalmente hacia el terraplén para aliviar la presión intersticial.

#### **7.4 Revegetalización**

Los mantos de revegetación se utilizan para controlar la erosión de la superficie y también se denominan biomantas cuando su material es biodegradable.

El Biomanto es una estera tejida abierta y flexible diseñada para aplicaciones de control de erosión superficial y diseñada para retener semillas y material orgánico en su lugar hasta que se establezca la vegetación. Son mallas de "polipropileno, bonote, fibra o aspecto natural" muy duraderas que protegen las superficies internas o externas del camino de entrada de la erosión causada por fenómenos naturales como la lluvia y el viento, al mismo tiempo que proporcionan sombra parcial y facilitan el almacenamiento de calor durante las separaciones iniciales y las reconstrucciones a la vez procesos.

#### **8 SOFTWARE ESPECIALIZADO PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES: SLIDE**

Slide es un software de análisis de estabilidad de taludes bidimensional que utiliza el método de equilibrio límite para los cálculos de estabilidad. Es ampliamente utilizado en minería e ingeniería para evaluar una amplia gama de problemas geotécnicos, como la estabilidad de terraplenes, represas, tajos de minas o taludes de edificios, los efectos de cargas externas, terremotos, la efectividad de los elementos de refuerzo.

Slide es un software de análisis de estabilidad de taludes bidimensional que utiliza el método de equilibrio límite para los cálculos de estabilidad. Incluye análisis de agua subterránea de elementos finitos en estado estacionario con sensibilidad integrada, capacidades de análisis probabilístico y retrospectivo.

Tiene una amplia gama de aplicaciones en minería e ingeniería civil para evaluar una amplia gama de problemas geotécnicos como la estabilidad de taludes en presas, terraplenes, minas o edificios, los efectos de cargas externas, terremotos, eficiencia de elementos de refuerzo, etc. software potente y flexible desarrollado por Rocscience, la empresa de modelado geotécnico líder en el mundo.

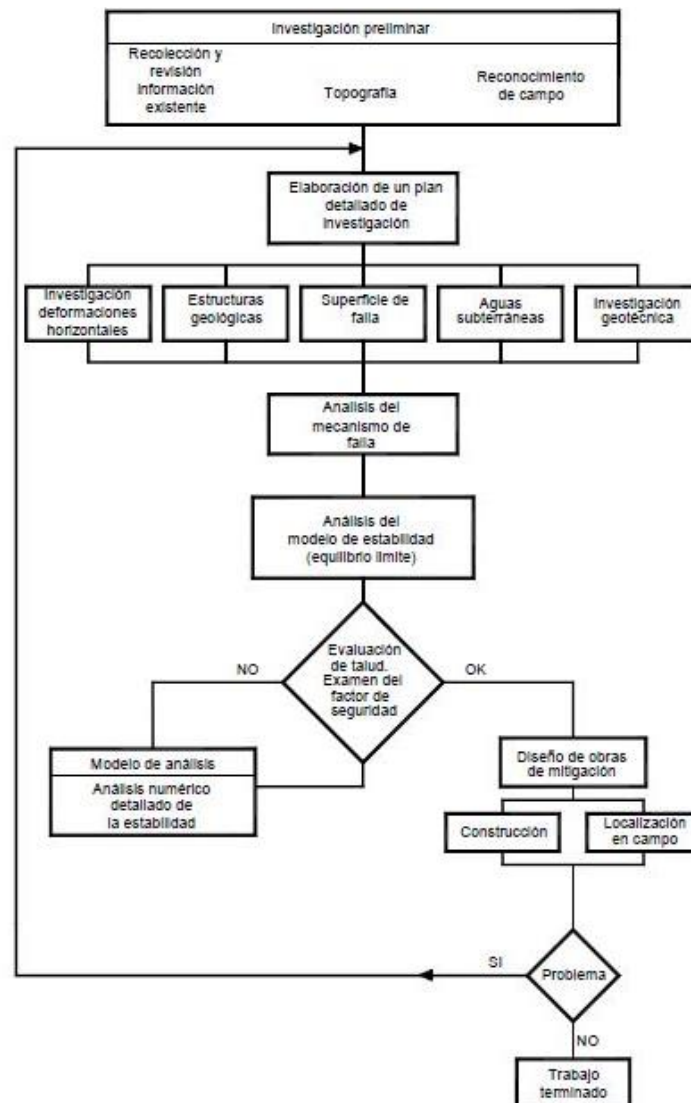
Slide puede modelar casi cualquier problema de estabilidad, incluyendo:

- Suelo natural y pendientes rocosas.
- Excavaciones de construcción.
- Presas y diques de tierra.
- Paredes altas de cielo abierto.
- Estructuras de tierra reforzada.
- Diseño de estabilización de taludes.
- Pistas con recargo o carga sísmica.
- Estabilidad de la presa durante la bajada rápida.
- Laderas insaturadas sometidas a infiltración.
- Estabilidad de la presa de relaves.

## 9 METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, la investigación se estructuró en cuatro fases, que se describen a continuación. En complemento con lo anterior, en la Figura 17 se presenta el diagrama de flujo general para la investigación y el análisis de deslizamientos, planteado por Suarez (2009), que se tuvo en cuenta en el presente trabajo.

Figura 17. Metodología para la investigación y el análisis de deslizamientos



Fuente: Suarez (2009)

De acuerdo con lo anterior, el trabajo se estructuró teniendo en cuenta la recopilación de información existente, así como el análisis y caracterización geotécnica del talud en estudio, el análisis de estabilidad y la propuesta de alternativas de solución. A continuación, se describen las fases establecidas para el presente trabajo de aplicación.

### **9.1 Caracterización general de la vía (Puerto Rico) en el sector en estudio**

Esta fase comprendió el análisis de la información existente en referencia a la descripción general de la zona de estudio, así como la caracterización climática, geológica y sísmica de la zona. Por otra parte, se realizaron visitas de campo para comprobar el estado actual del talud y se llevó a cabo el levantamiento topográfico incluyendo los detalles más relevantes para la posterior realización del perfil geotécnico, así como la respectiva caracterización geotécnica de los materiales que componen el talud y los ensayos de laboratorio realizados para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo. La fase I incluyó la realización de las siguientes actividades:

### **9.2 Descripción geológica de la zona de estudio**

Para la descripción geológica de la zona de estudio se consultó información secundaria por medio de fuentes como el IGAC, INGEOMINAS (actualmente SGC), NSRO (2010), EOT de los municipios de Toledo y Labateca, Planes de Desarrollo Municipal de Toledo y Labateca, entre otros, para la referencia de los aspectos correspondientes a la caracterización geológica, geomorfológica y sísmica.

### **9.3 Caracterización climática de la zona de estudio**

Esta subfase abarcó la solicitud y procesamiento de los datos registrados por las estaciones meteorológicas pertenecientes al IDEAM localizadas en cercanías a la zona de estudio, correspondientes a precipitación y temperatura, con la finalidad de realizar un análisis de la variación temporal de las variables y su incidencia en los procesos de remoción en masa ocurridos en el talud de estudio. Además, se recopiló información secundaria de fuentes como el EOT del municipio de Toledo (2001) y el Plan de Desarrollo Municipal para complementar el análisis climático en la zona de estudio. La caracterización climática incluyó las gráficas de la variación temporal de la precipitación, cálculo del coeficiente pluviométrico, curvas IDF y descripción del comportamiento de la temperatura.

### **9.4 Levantamiento topográfico de la zona de estudio**

Esta actividad implicó el levantamiento topográfico planimétrico y altimétrico en la zona de estudio, que comprende el talud superior e inferior de la vía que comunica los municipios de Toledo y Labateca en el sector Puerto Rico.

Figura 18. Reconocimiento en campo-Topografía



Fuente: Elaboración propia

En primera medida se hizo un reconocimiento en campo a la zona de estudio, analizando la topografía existente, detalles y localización de los mojones de control presentes; de acuerdo a esto, se definió que para la realización del levantamiento, la metodología más acorde fue emplear un GPS Submétrico RTK STONEX S800 para la cobertura de toda el área, levantando los detalles más relevantes del sector como partes del talud, linderos, vía, puente, márgenes del río Culagá, infraestructura existente, entre otros (Figura 18).

El levantamiento topográfico se realizó mediante el método de poligonal cerrada con cierre 1:1000 y toma de detalles por radiación, empleando un GPS submétrico RTK STONEX S800, que permitió el proceso de recolección de datos precisos y detallados, puesto que este equipo maneja márgenes de error milimétricas (Figura 19).

Figura 19. GPS Submétrico RTX STONEX S800



Fuente: Elaboración propia

El GPS Submétrico está equipado con una placa GNSS avanzada 555 canales y es capaz de soportar múltiples constelaciones de satélites, incluyendo GPS, GLONASS, BEIDOU y GALILEO. El diseño avanzado del receptor proporciona al S800 una excelente capacidad de seguimiento de señal y una capacidad resistente a la interferencia. Las ventajas de la portabilidad y la velocidad de operación hacen que el receptor S800 GNSS sea particularmente adecuado para el trabajo de campo en áreas de terreno complejo. El Stonex S800 tiene una capacidad interna incorporada de Bluetooth que permite elegir su modelo y software de recopilador de datos.

Por otra parte, se localizaron puntos de referencia o auxiliares para verificar las alturas o elevaciones del terreno (Figura 20 y Tabla 5). La información recopilada se procesó y se generó la georreferenciación de los puntos para obtener las coordenadas reales en sistema MAGNA Colombia Bogotá (coordenadas planas), de las cuales se efectuaron los amarres para la toma de los detalles correspondientes al talud, vía, puente, linderos, infraestructura existente, potreros, márgenes del río Culagá, entre otros. Finalmente, se generó el plano topográfico con curvas de nivel cada metro en AutoCAD Civil 3D 2018.

Figura 20. Localización puntos auxiliares o de referencia



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Información de los puntos auxiliares o de referencia

DESCRIPCIÓN	NORTE (m)	ESTE (m)	ALTURA (m.s.n.m)
AUX1	1174921,909	1300519,12	1451,432
AUX2	1174888,546	1300474,806	1430,14
AUX3	1174895,204	1300475,523	1428,922
AUXD1	1174911,011	1300539,086	1450,408

Fuente: Elaboración propia

Durante la ejecución del levantamiento topográfico con el sistema convencional se tomaron alrededor de 3163 detalles. A continuación, se muestran los códigos utilizados para realizar el levantamiento topográfico con GPS Submétrico de Mínima Precisión RTK Stonex S800 en la zona donde se localiza el talud en análisis (Tabla 6).

Tabla 6. Detalles y abreviaturas utilizadas en el levantamiento topográfico

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN
ALCANTARILLA	Alcantarilla
AUX1	Amarre Aux1
AUX2	Amarre Aux2
AUX3	Amarre Aux3
AUXD1	Amarre AuxD1
BR	Borde Río
BV	Borde Vía
CM	Corona Muro
CT	Corona Talud
EJE	Eje vía
LINDERO	Lindero
PT	Pata talud
PUENTE	Puente
TALUD	Talud
TANQUE	Tanque
TN	Terreno Natural

Fuente: Elaboración propia

## 9.5 Exploración geotécnica

Esta subfase integró la exploración geotécnica del subsuelo mediante sondeos mecánicos a diferentes profundidades, así como la realización de ensayos geofísicos que incluyeron líneas de refracción sísmica y los ensayos de laboratorio para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas correspondientes de los materiales que componen el talud en estudio.

### 9.5.1 Sondeos geotécnicos

Los sondeos geotécnicos hacen parte de las exploraciones directas realizadas para determinar las características y composición de los materiales presentes en el suelo o los taludes, y establecer las condiciones geotécnicas del subsuelo. De acuerdo

con lo anterior, se realizaron perforaciones en la zona de estudio mediante equipos de roto percusión y perforaciones con equipo de percusión simple con la finalidad de obtener un perfil geotécnico típico del suelo.

### **9.5.2 Ensayos geofísicos**

Los ensayos geofísicos son métodos indirectos que permiten conocer características sísmicas de los diferentes materiales. Para el caso, se ejecutó el ensayo de refracción sísmica. La refracción sísmica es uno de los métodos de prospección más tradicionales de la geofísica; su principio fundamental se basa en la medición de los tiempos de viajes de ondas sísmicas generadas por una fuente impulsiva en la superficie del subsuelo y que son refractadas en las interfaces entre medios con propiedades físicas diferentes.

### **9.5.3 Ensayos de laboratorio**

Para la determinación de las propiedades físicas y de resistencia del suelo presente en la zona de estudio se emplearon las muestras tomadas en los sondeos especificados anteriormente. Las muestras fueron llevadas al laboratorio donde se determinaron los ensayos de clasificación de suelos, humedad, límites de consistencia, corte directo y compresión inconfiada aplicando las metodologías establecidas por la normatividad vigente.

## **9.6 Análisis De Estabilidad Del Talud Mediante El Software Slide Especializado En Geotecnia**

En esta fase se efectuó el modelamiento del terreno natural por medio del software Slide. Para esto, se utilizaron los resultados de la exploración geotécnica, los ensayos geofísicos y los ensayos de laboratorio correspondientes a las propiedades físicas y de resistencia del suelo, obtenidos previamente. De igual forma, se utilizó la información correspondiente al levantamiento topográfico para la definición de la geometría del talud.

En Slide se determinó el factor de seguridad al deslizamiento del talud sin obras de estabilización bajo las condiciones de análisis estático y pseudoestático, teniendo en cuenta el equilibrio de momentos y fuerzas que actúan sobre la masa de suelo. Para esto, se tuvieron en cuenta las especificaciones de la NSR (2010) respecto a los valores mínimos admisibles del factor de seguridad en taludes para el análisis estático y pseudoestático.

### **9.6.1 Diseño de las obras de mitigación a nivel geotécnico según la norma NSR-10**

A partir de la información recolectada en campo, la caracterización geológica y geotécnica, los ensayos geofísicos, las propiedades físicas y mecánicas del suelo determinadas en laboratorio y la modelación del análisis de la estabilidad del talud en estudio llevada a cabo en Slide, se propuso el diseño de obras de ingeniería viables para la mitigación de los deslizamientos ocurridos, que cumplieran con el factor de seguridad mínimo admisible establecido por la NSR (2010) para la estabilización de taludes.

### **9.7 Cálculo del presupuesto y programación de las obras de mitigación seleccionadas en los diseños**

Por último, se desarrolló la fase de cálculo del presupuesto y programación de las obras de mitigación seleccionadas en los diseños. De acuerdo a esto, se describen cuatro subfases:

1. Cálculo de las cantidades de obra estipuladas en los diseños. Se realizó la memoria de cálculos de cantidades apoyándose en los planos impresos o digitales de los diseños.
2. Cálculo de los precios por unidad de producción. Se determinó el recurso humano, los materiales y los equipos necesarios para cada unidad de producción.
3. Estructuración del presupuesto y cálculo del costo total. Se realizó la cuantificación de los precios por unidad de producción del programa.
4. Cálculo de las duraciones por actividad y programa de la obra. Se realizó el planteamiento y estructuración del cronograma para la realización de las actividades propuestas y programa de la obra.

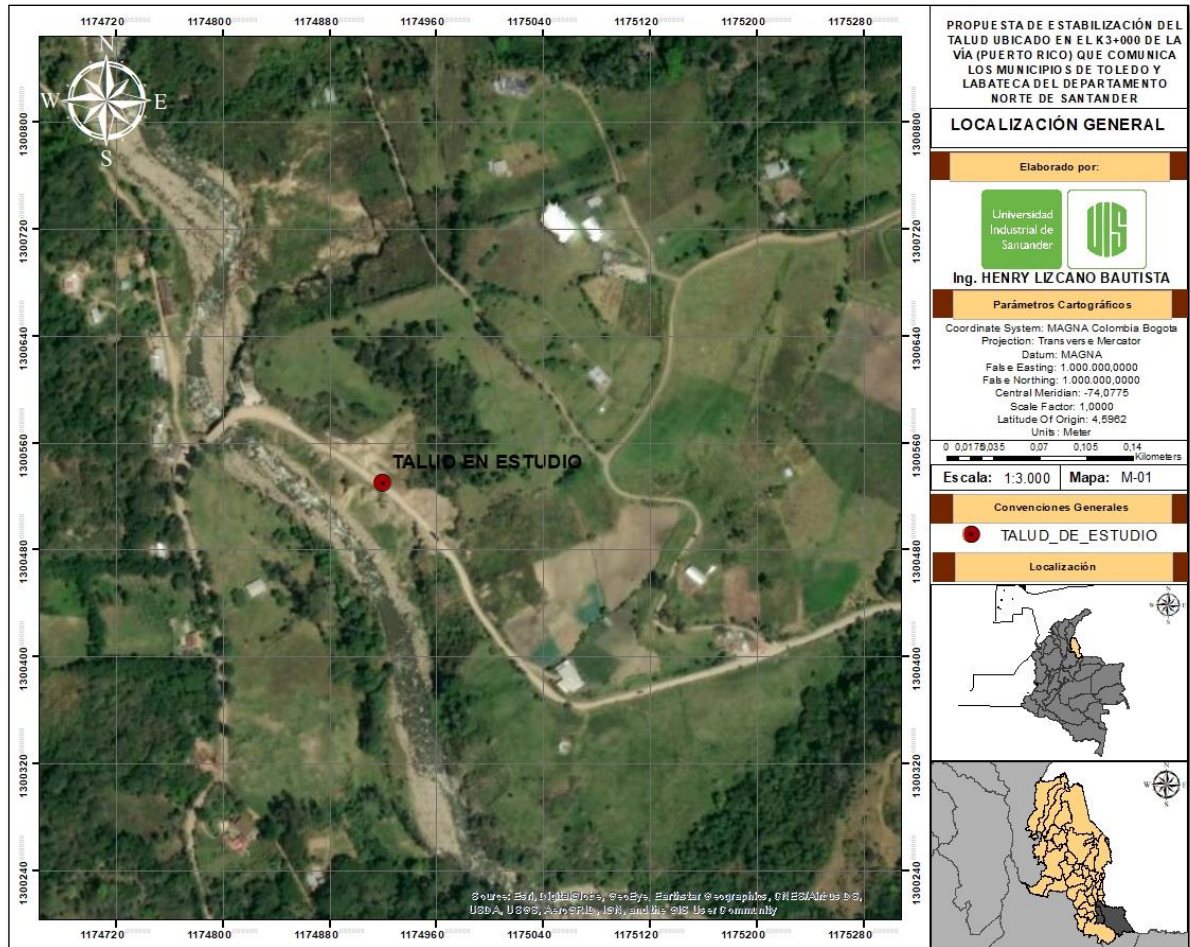
## 10 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Este capítulo presenta la caracterización general de la zona de estudio, que comprende la localización del talud en estudio y los aspectos geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, climáticos, sísmicos y topográficos de la zona crítica. De igual forma, abarca la recopilación de información secundaria por medio de fuentes de entidades gubernamentales y la información recolectada en campo.

La zona de estudio se ubica sobre diferentes tipos de relieves, entre los que se destacan los relieves de montaña (núcleo y flanco oriental de la cordillera oriental). El talud en estudio se encuentra localizado dentro de los límites de la vereda Toledito, en el K2+250, de la vía (Puerto Rico) que comunica los municipios de Toledo y Labateca del departamento Norte de Santander sobre los 1457 m.s.n.m (Figura 20).

El panorama integral de amenazas a las que está expuesto en un momento dado el territorio de Toledo, está constituido por condiciones, procesos y manifestaciones naturales, que por sus niveles de energía acumulada y/o potencialmente liberable en periodos de tiempo relativamente cortos, tienen la capacidad suficiente de transformar, afectar o alterar significativamente la condición física-ambiental del territorio municipal (área urbana y rural), de acuerdo a la magnitud de daños potencial, o de los cambios temporales y definitivos que pueden causar sobre los distintos elementos del paisaje o el medio natural. Del mismo modo, se estiman bajo esta condición aquellos fenómenos naturales que pueden poner en peligro vidas humanas y ecosistemas (PDT Toledo, 2016).

Figura 21. Localización talud en estudio



Fuente: Elaboración propia

El análisis de amenaza en la zona de estudio está comprendido por remoción en masa, dinámica fluvial torrencial, actividad sismo-tectónica e inundaciones. Según el EOT de Toledo (2001), en el área que comprende la vía que comunica a Toledo y Labateca se presenta una amenaza media por deslizamiento, a causa de movimientos en masa activos, composición del suelo tipo arcilloso, saturación, pendiente, taludes de la vía, entre otros; además, se han evidenciado hundimientos en la vía, desplazamiento de cercados y reptación de arbustos. De igual manera, en la vereda Toledito, sobre la vertiente Oriental del río Culagá y al occidente del casco urbano del municipio de Toledo se presenta una amenaza alta por erosión, a causa de la clausura de receberas y areneras que desestabilizan la base del talud de la

vereda, añadiendo a esto que es una zona de alta pendiente; se ha evidenciado mancha de extracciones, taludes sin manejo, explotación antitécnica y modificación del paisaje.

## **10.1 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA**

La caracterización geológica de la zona de estudio se realizó a partir de la información registrada por el INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano, correspondiente a la Plancha 111-Toledo escala 1:100000.

En la zona de estudio afloran rocas terciarias propias de las formaciones Carbonera y Mirador. También se encuentran depósitos cuaternarios que rellenan valles y llanuras aluviales. El área donde se localiza el talud en estudio es tectónicamente compleja, que se caracteriza por su estilo estructural de fallamiento inverso y plegamiento. Así mismo, el área ha sido afectada por fenómenos naturales como los deslizamientos, las inundaciones y la erosión según registros de INGEOMINAS (2001).

### **10.1.1 Estratigrafía**

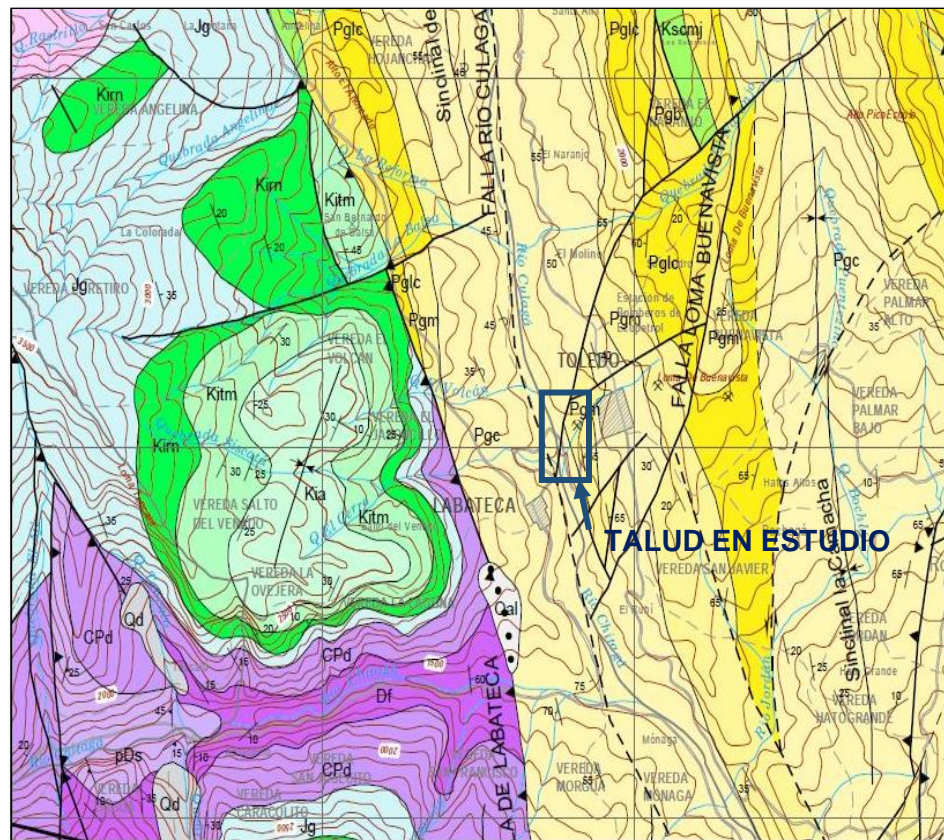
Este apartado presenta las características litológicas de las unidades reconocidas y cartografiadas en la zona de estudio. Las rocas presentes en la zona pertenecen al cenozoico, donde se han agrupado en las formaciones Mirador y Carbonera (Figura 22).

#### **10.1.1.1 Formación Mirador (Tem)**

Se presentan como una franja alargada con dirección noreste y forma parte de las estructuras de pliegues presentes en la región centro-occidental. Está constituida en su parte inferior por areniscas de cuarzo, blancas, gris claras a blanco

amarillentas, grano medio, y en parte conglomeráticas, separadas por niveles de lodolitas grises, carbonosas. En la parte media alta se presenta un nivel de lodolitas grises, localmente ferruginosas y carbonosas, con algunas intercalaciones de areniscas de cuarzo, grano fino. La parte superior está conformada por areniscas blancas, de grano medio a ligeramente conglomeráticas, feldespáticas y ferruginosas (INGEOMINAS, 2001).

Figura 22. Mapa geológico regional y localización del talud en estudio



**LEYENDA GEOLÓGICA**

Pgc	Pgm	Qal	Qd
FORMACIÓN CARBONERA	FORMACIÓN MIRADOR	ALUVIÓN	COLUVIÓN-DERRUBIO

Fuente: Elaboración propia a partir de la Plancha 111-Toledo de INGEOMINAS (2001)

### **10.1.1.2 Formación Carbonera (Tec)**

La unidad consiste en una secuencia de lodolitas grises a gris verdosas, con intercalaciones de areniscas arcillosas; presenta capas de carbón en la parte inferior y superior. Esta formación aflora en la región localizada al oriente de la falla de Labateca, donde conforma los núcleos de los sinclinales de Culagá y La Camacha (INGEOMINAS, 2001).

Está compuesta por lodolitas grises, grises amarillentos a grises rojizas, localmente ferruginosas, micáceas con nódulos ferruginosos aplanados, paralelos con la estratificación, en capas generalmente gruesas. Las intercalaciones son de areniscas de cuarzo, blancas y grises, grano fino y medio, ligeramente lodosas micáceas, localmente feldespáticas, con óxidos de hierro, restos carbonosos e intraclastos de lodolitas, en capas medianas y gruesas (INGEOMINAS, 2001).

### **10.1.1.3 Depósitos cuaternarios (Qd, Qal)**

Se presentan pequeños sectores con algunos depósitos coluviales y de derrubios, que están agrupados en la unidad cuaternaria más antigua (Qd). También se presenta la unidad cuaternaria más joven (Qal), conformada por depósitos aluviales que están distribuidos a lo largo de los valles de las principales corrientes como son los ríos Chitagá, Culagá, Valegrá y Margua (INGEOMINAS, 2001).



#### **10.1.2.1 Sinclinal de Culagá**

Presenta una dirección predominante norte-sur, cuyo eje está afectado por la falla del mismo nombre. Está limitado en sus flancos orientales por las fallas Valegrá, El Trapiche, Loma-Buenavista y los estratos occidentales están invertidos por efectos de la Falla de Labateca. El núcleo está constituido por la Formación Carbonera y los flancos por las formaciones Barco, Los Cuervos y Mirador (INGEOMINAS, 2001).

#### **10.1.2.2 Falla de Culagá**

Es una falla de desplazamiento vertical, que sirve de límite entre los municipios de Toledo y Labateca. Tiene dirección N-S. También se clasifica como una falla inferida según registros de INGEOMINAS.

#### **10.1.2.3 Falla de Labateca**

Es el mayor rasgo tectónico localizado en la región centro-occidental de la zona de estudio, y corresponde a una falla regional inversa, que tiene una dirección NS a NW-SE y enfrenta rocas paleozoicas, jurásicas y cretácicas al occidente con rocas terciarias al oriente.

### **10.1.3 Geomorfología**

La topografía en la zona de estudio es abrupta, con pendientes muy fuertes y valles profundos; se encuentran zonas con pendiente moderada y relieve relativamente suave. En la zona de estudio se presentan alturas entre los 1427 y 1510 m.s.n.m.

Sobre la zona donde se localiza el talud en análisis se presentan dos unidades geomorfológicas predominantes: unidad geomorfológica de origen aluvial,

conformada por el cauce o lecho del río Culagá y su planicie de inundación (Figura 24), y la unidad de loma, localizada sobre toda la superficie que comprende el talud.

*Figura 24. Unidades geomorfológicas de origen aluvial*



*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 25 se muestra la unidad de relieve de loma presente en la zona de estudio, localizada a lo largo del talud en análisis.

Figura 25. Unidad de loma en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

#### **10.1.4 Procesos Morfodinámicos**

En este apartado se describen los principales procesos morfodinámicos que tienen lugar en la zona de estudio, asociados a fenómenos naturales como deslizamientos, inundaciones y actividad sísmica.

##### **10.1.4.1 Deslizamientos**

La amenaza por deslizamientos se debe fundamentalmente a factores litológicos, estructurales, topográficos, climáticos, así como a la actividad humana. Los municipios de Labateca y Toledo presentan amenazas por deslizamiento debido a que están construidos sobre suelos arcillosos, en zonas ligeramente inclinadas y afectadas por una tectónica relativamente intensa; a causa de estos factores se han presentado problemas de procesos erosivos (INGEOMINAS, 2001). En Toledo se encuentran varios sectores críticos a causa de la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa como deslizamientos, reptación y flujos de lodo, especialmente los sectores de IMA-El Retiro, El Palmar-Jordán, Toledo-Labateca y La Lejía, que

requieren de estudios detallados conducentes a mitigar las amenazas existentes (Figura 26).

*Figura 26. Deslizamientos en el talud de estudio*



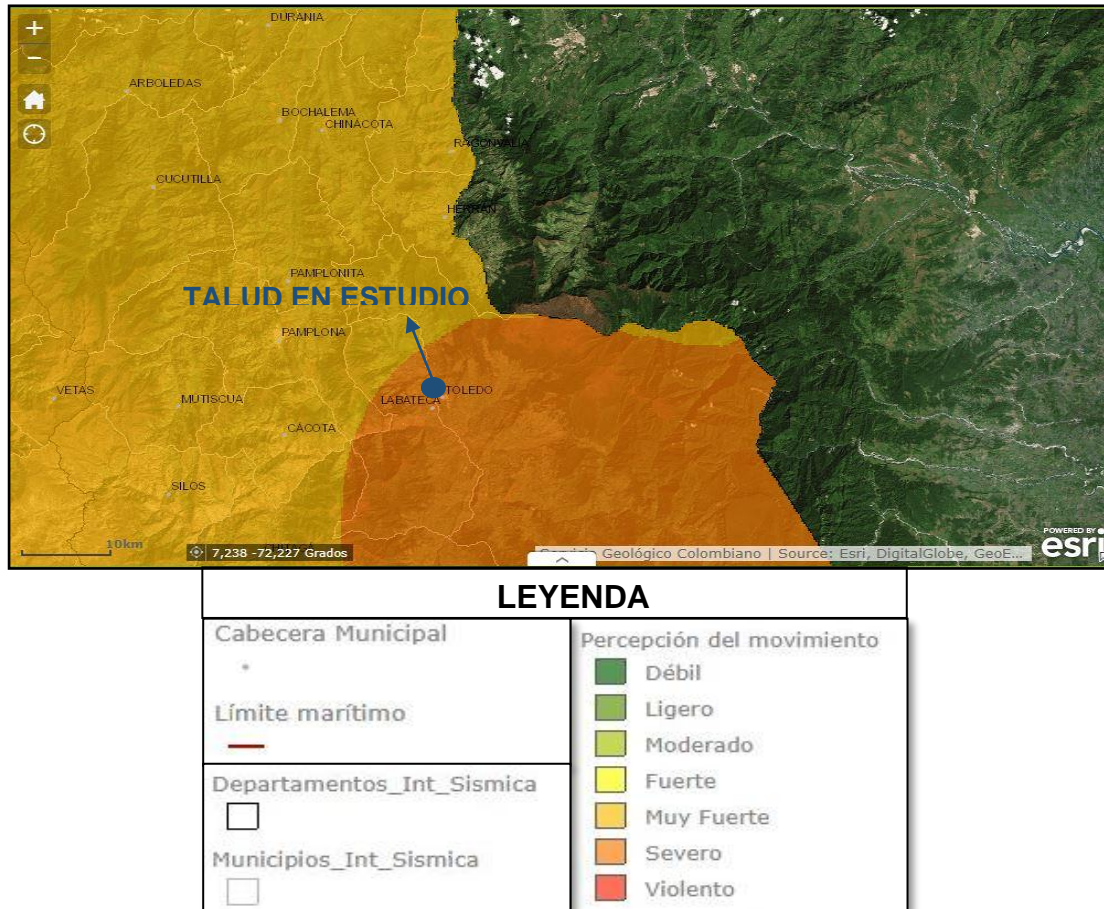
*Fuente: Elaboración propia*

Las carreteras de la zona no cuentan con un mantenimiento apropiado de carácter permanente y no cuentan con suficientes obras hidráulicas; además, se suman factores referentes al diseño, trazado y construcción misma de las carreteras (bancadas, taludes), generando problemas de estabilidad por deslizamientos y cálidas de rocas y suelos, especialmente en épocas de lluvias.

## **10.2 SISMICIDAD**

El área se localiza en una zona de alta sismicidad dentro del departamento Norte de Santander y con una percepción de movimientos sísmicos de carácter “Severo” según la zonificación realizada por el Servicio Geológico Colombiano (Figura 27).

Figura 27. Amenaza sísmica en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de la zonificación sísmica del SGC

La zona de estudio y las áreas adyacentes se agrupan en una zona de amenaza sísmica muy alta, donde se pueden presentar sismos con intensidades entre 8 y 9. Además, la sismicidad de estas áreas y las de la región oriental de Norte de Santander, están muy relacionadas con la actividad tectónica desarrollada y asociada con el sistema de falla de Boconó en los territorios occidentales de Venezuela (INGEOMINAS, 2001).

Por su parte, la NSR (2010), establece tres zonas de amenaza sísmica en Colombia: Alta, Intermedia y Baja. De acuerdo con lo anterior, los municipios de Toledo y Labateca, donde se localiza la zona de estudio, se encuentran en una zona de

amenaza sísmica alta según la zonificación realizada. En la Tabla 7 se registran los valores de aceleración sísmica y la definición de la zona de amenaza sísmica para los municipios de Toledo y Labateca.

Tabla 7. Valores de  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$  y  $A_d$  y definición de la zona de amenaza de los municipios de Toledo y Labateca, Norte de Santander

Municipio	Código	Zona de amenaza				
	municipio	$A_a$	$A_v$	sísmica	$A_e$	$A_d$
<b>Labateca</b>	54377	0.35	0.30	Alta	0.14	0.06
<b>Toledo</b>	54820	0.35	0.30	Alta	0.24	0.10

Fuente: Apéndice A-4 de la NSR (2010)

La NSR (2010), establece que para el análisis y diseño de taludes se debe emplear la aceleración máxima del terreno  $a_{max}$ . El coeficiente sísmico de diseño para el análisis pseudoestático de taludes KST tiene valor igual o inferior al de  $a_{max}$  y se admiten los valores mínimos de  $K_{ST}/a_{max}$  descrito--s en la Tabla 8, dependiendo del tipo de material terreo (reforzado o no) y del tipo de análisis. En los análisis de estabilidad de taludes deben considerarse los criterios de susceptibilidad al deslizamiento asociado a sismo.

Tabla 8. Valores de  $K_{ST}/a_{max}$  Mínimos para Análisis Pseudoestático de Taludes

Material	$K_{ST}/a_{max}$ Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
<b>Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD&lt;50%)</b>	0.80	Ninguno
<b>Macizos rocosos (RQD&gt;50%)</b>	1.00	Ninguno
<b>Todos los materiales térreos</b>	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
<b>Todos los materiales térreos</b>	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: Sección H.5.2.5 de la NSR (2010)

De acuerdo con lo anterior, el valor mínimo del coeficiente pseudoestático para el presente análisis es  $K_{ST}/a_{max} = 0.80$ . Luego,  $K_{ST}/0.35 = 0.80$ . Finalmente,  $K_{ST} = 0.35 \cdot 0.80 = 0.28 g$ .

### 10.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la caracterización climática de la zona de estudio se recopiló información secundaria del Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Toledo (2001), así como los valores de precipitaciones totales y precipitaciones máximas en 24 horas, registrados en la estación más cercana perteneciente al IDEAM para el análisis de la precipitación a nivel temporal (Tabla 9), teniendo en cuenta que esta variable ha incidido en gran medida en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en la zona donde se localiza el talud en análisis.

Tabla 9. Información estación Labateca

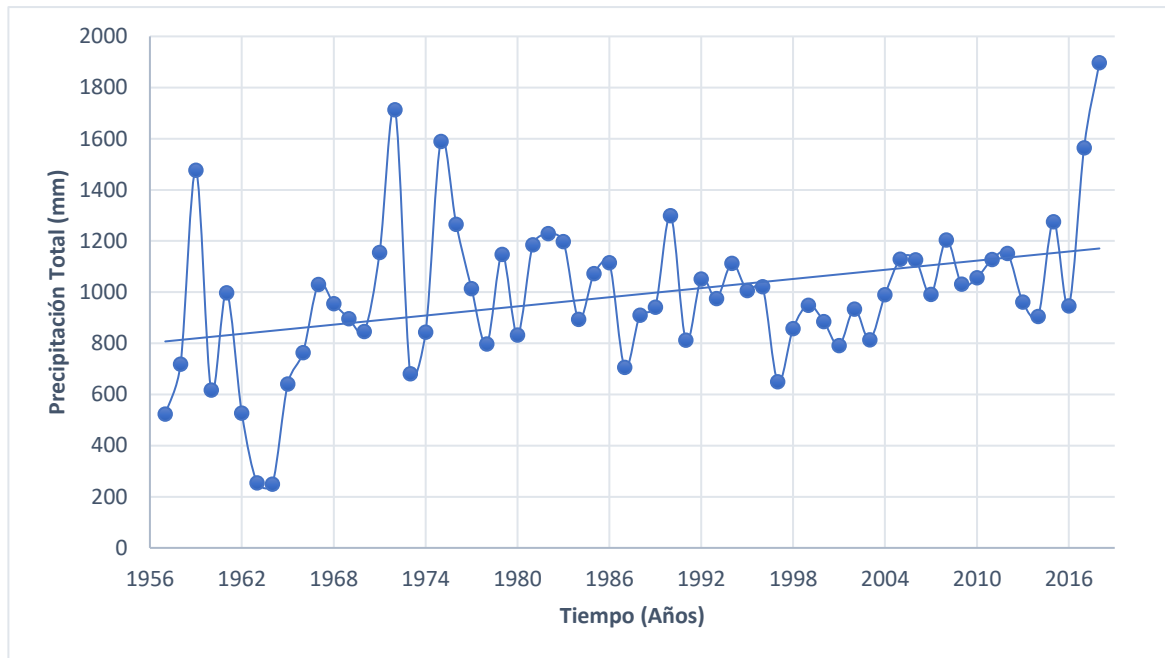
Nombre	Categoría	Corriente	Coordenadas	Altitud (m.s.n.m)	Serie Histórica
<b>Labateca</b> [37010010]	Pluviométrica	Santa Cruz	7,29805556 N -72,50055556 W	1560	1957-2018

Fuente: Elaboración propia

#### 10.3.1 Precipitación

El análisis de la lluvia en la zona de estudio se realizó a partir de los datos de precipitaciones totales y máximas en 24 horas, registrados en la estación Labateca perteneciente al IDEAM. La Figura 28 muestra el comportamiento temporal de las precipitaciones totales en la zona de estudio, para el periodo 1957-2018.

Figura 28. Precipitaciones totales-Estación Labateca

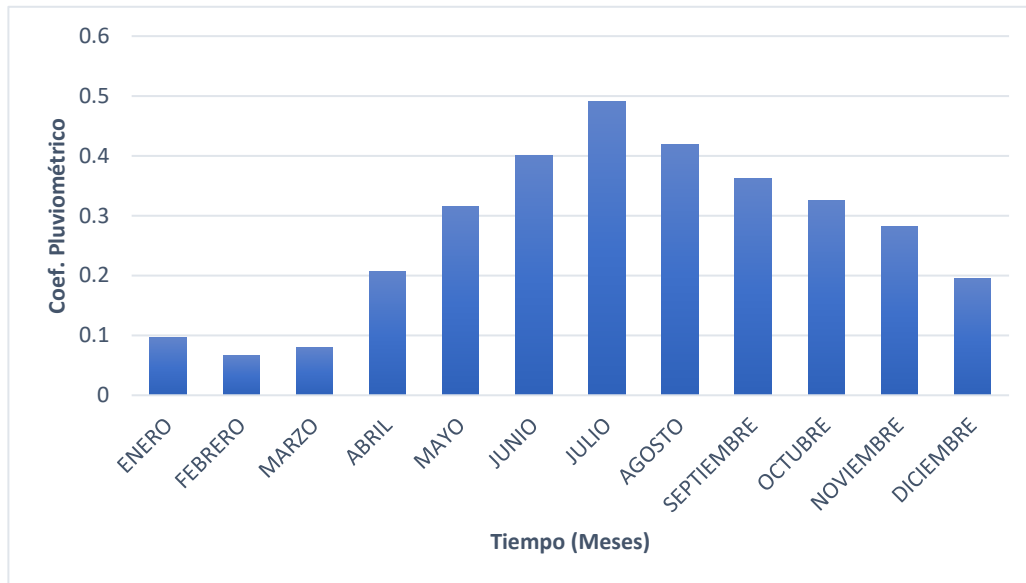


Fuente: IDEAM

La precipitación media en la zona de estudio es de 989 mm, variando desde los 249 hasta los 1897 mms, según los valores registrados en la estación Labateca. El comportamiento temporal de la precipitación muestra una tendencia hacia el aumento a futuro, teniendo en cuenta las precipitaciones máximas que han ocurrido a lo largo de la serie histórica, como en los años 1959, 1972 y recientemente en 2018.

La Figura 29 representa el coeficiente pluviométrico obtenido a partir de los valores de precipitaciones totales mensuales multianuales de la estación Labateca.

Figura 29. Coeficiente pluviométrico-Estación Labateca



Fuente: IDEAM

Según la figura anterior, el régimen de la precipitación en la zona de estudio es monomodal, es decir, un periodo de lluvias durante el año y dos periodos secos. Los meses en que se presenta la mayor precipitación son mayo, junio, julio y agosto mientras que los periodos secos están comprendidos por los meses de enero-abril y septiembre-diciembre. En el análisis de estabilidad de taludes se debe considerar las variaciones en el régimen de la lluvia, puesto que es un factor de gran incidencia en la ocurrencia de fallas o deslizamientos.

Las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia permiten analizar el comportamiento espacio-temporal de la precipitación en una determinada zona. Para el caso, se realizaron las curvas IDF de la estación Labateca (Figura 30), por ser la más cercana a la zona de estudio, a partir de los valores mensuales multianuales de precipitaciones máximas en 24 horas para el periodo 1957-2018.

Por medio de la ecuación de Gumbell se determinó la probabilidad de ocurrencia y se ajustó el valor de las precipitaciones; así mismo, se hallaron las intensidades

para cada periodo de retorno y una regresión potencial. Por último, para obtener las intensidades máximas se empleó la ecuación de Bernard y se realizaron las curvas IDF para los periodos de retorno establecidos (Tabla 10).

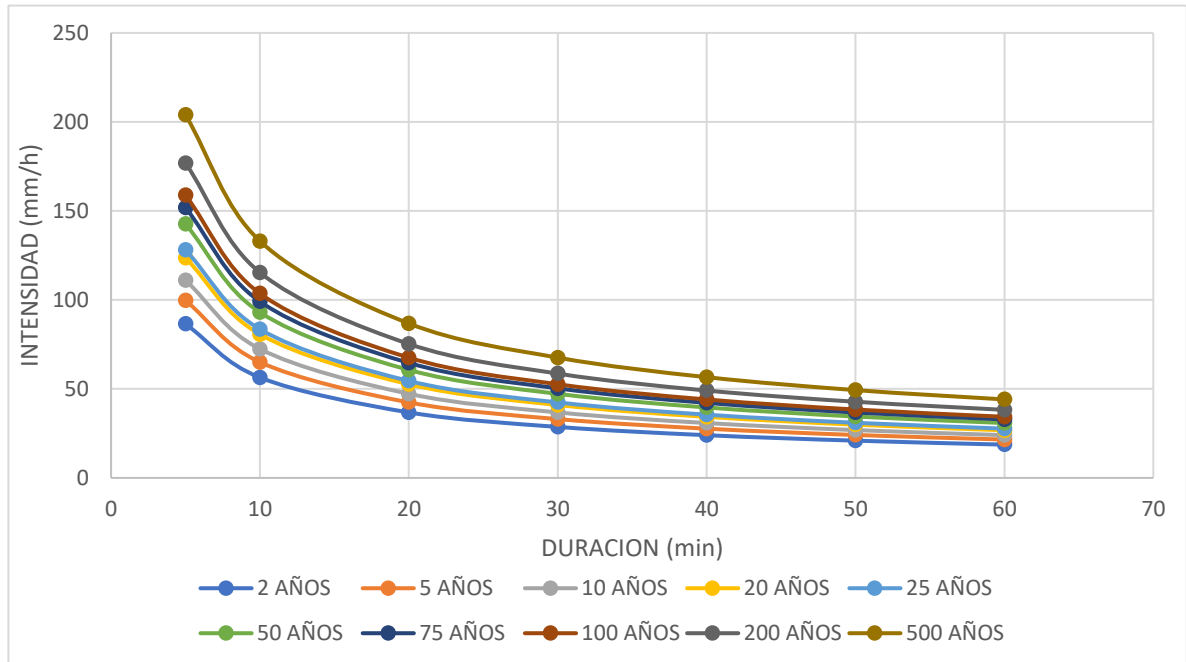
Tabla 10. Intensidades máximas para diferentes periodos de retorno

FRECUENCIA (Años)	Duración (Minutos)						
	5	10	20	30	40	50	60
2	86,478	56,410	36,796	28,659	24,002	20,918	18,694
5	99,707	65,039	42,425	33,044	27,674	24,118	21,554
10	111,044	72,434	47,249	36,800	30,821	26,860	24,005
20	123,670	80,670	52,621	40,985	34,325	29,914	26,734
25	128,032	83,516	54,478	42,430	35,536	30,969	27,677
50	142,589	93,011	60,672	47,255	39,576	34,491	30,824
75	151,860	99,059	64,616	50,327	42,149	36,733	32,829
100	158,801	103,586	67,570	52,627	44,076	38,412	34,329
200	176,857	115,364	75,252	58,611	49,087	42,779	38,232
500	203,913	133,013	86,765	67,578	56,597	49,324	44,081

Fuente: Elaboración propia

Según la forma de las curvas IDF, a medida que aumenta la intensidad de la precipitación, disminuye la duración de la tormenta; comportamiento que se mantiene para todos los periodos de retorno establecidos. La máxima intensidad para una duración de 5 minutos varía entre 86,47 mm/h para un periodo de retorno de 2 años y 203,91 mm/h para un periodo de retorno de 500 años. De otro modo, para una duración de tormenta de 60 minutos, las variaciones de la intensidad máxima de precipitación oscilan entre 18,69 mm/h para un periodo de retorno de 2 años y 44,08 mm/h para un periodo de retorno de 500 años; lo que refleja un comportamiento típico de una tormenta, según lo descrito por Chow et al., (1994).

Figura 30. Curvas IDF-Estación Labateca



Fuente: Elaboración propia

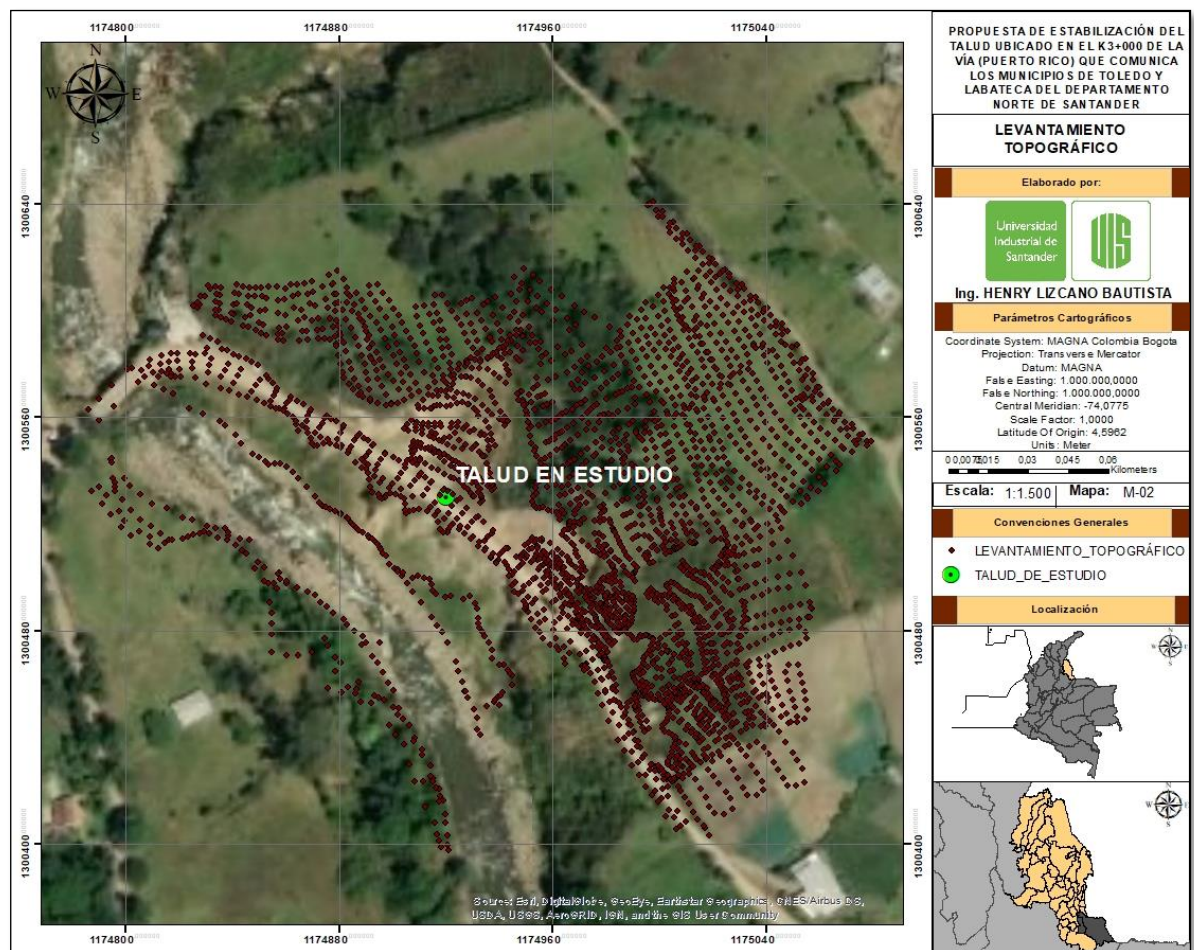
### 10.3.2 Temperatura

La altitud sobre el nivel del mar del municipio de Toledo es de 1642 m.s.n.m, y la del talud ubicado en el K2+250 de la vía (Puerto Rico) es de 1457 metros. La temperatura promedio es de 21°C. En el municipio de Toledo existen desde los pisos térmicos cálidos con temperatura media anual superior a los 25°C; el piso templado con temperatura de 18°C a 24°C, el frío en temperatura media anual entre los 10°C y 17°C y el páramo con temperaturas inferiores a 10°C (EOT Toledo, 2001).

## 11 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

El levantamiento topográfico tuvo como finalidad detallar la zona de estudio, correspondiente al talud ubicado en la vía que comunica los municipios de Toledo y Labateca (K2+250 sector Puerto Rico), definiendo y referenciando las partes que componen el talud, la vía, el puente, márgenes del río Culagá, partes del terreno natural y otros detalles como linderos, casas y obras hidráulicas como alcantarillas para obtener el perfil del talud en estudio y posteriormente realizar las modelaciones. En la Figura 31 se muestra la localización general de los puntos donde se realizó el levantamiento topográfico en la zona de estudio.

Figura 31. Localización de los puntos del levantamiento topográfico



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 32 se presentan algunas evidencias fotográficas referentes al levantamiento topográfico realizado en la zona de estudio.

*Figura 32. Levantamiento topográfico en el talud de estudio*



*Fuente: Elaboración propia*

La zona de estudio comprende un área de aproximadamente 49287.938 m<sup>2</sup> según la delimitación establecida por la topografía, con unas alturas sobre el nivel del mar que oscilan entre los 1427.253 y 1509.808 metros.

De acuerdo a lo anterior, se generó el plano topográfico de la zona de estudio (K2+250 vía Toledo-Labateca sector Puerto Rico) a partir de los datos registrados en la cartera topográfica mediante AutoCAD Civil 3D, que permitió identificar las características y detalles descritos anteriormente.

La información completa, correspondiente a la cartera topográfica, plano topográfico, perfiles y registro fotográfico se presentan en los Anexos.

## 12 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

En este apartado se presenta la descripción de la exploración geotécnica realizada en campo para determinar el tipo de material y espesores aproximados que componen el talud en análisis.

### 12.1 Sondeos geotécnicos

Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizaron ensayos mecánicos a diferentes profundidades para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que componen en talud.

La información detallada referente a las perforaciones, sondeos y apiques realizados en la zona de estudio se encuentra en el Anexo A.

La exploración directa realizada corresponde a la realización de sondeos y apiques con recuperación de muestras alteradas e inalteradas sobre las cuales se realizan diferentes ensayos de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de cada uno de los materiales encontrados.

A continuación, se presenta la ubicación de los apiques y sondeos realizados.

*Tabla 11. Apiques realizados en la zona de estudio.*

ID. Apique	Abscisa	Profundidad [m]
5	2+250	1.20

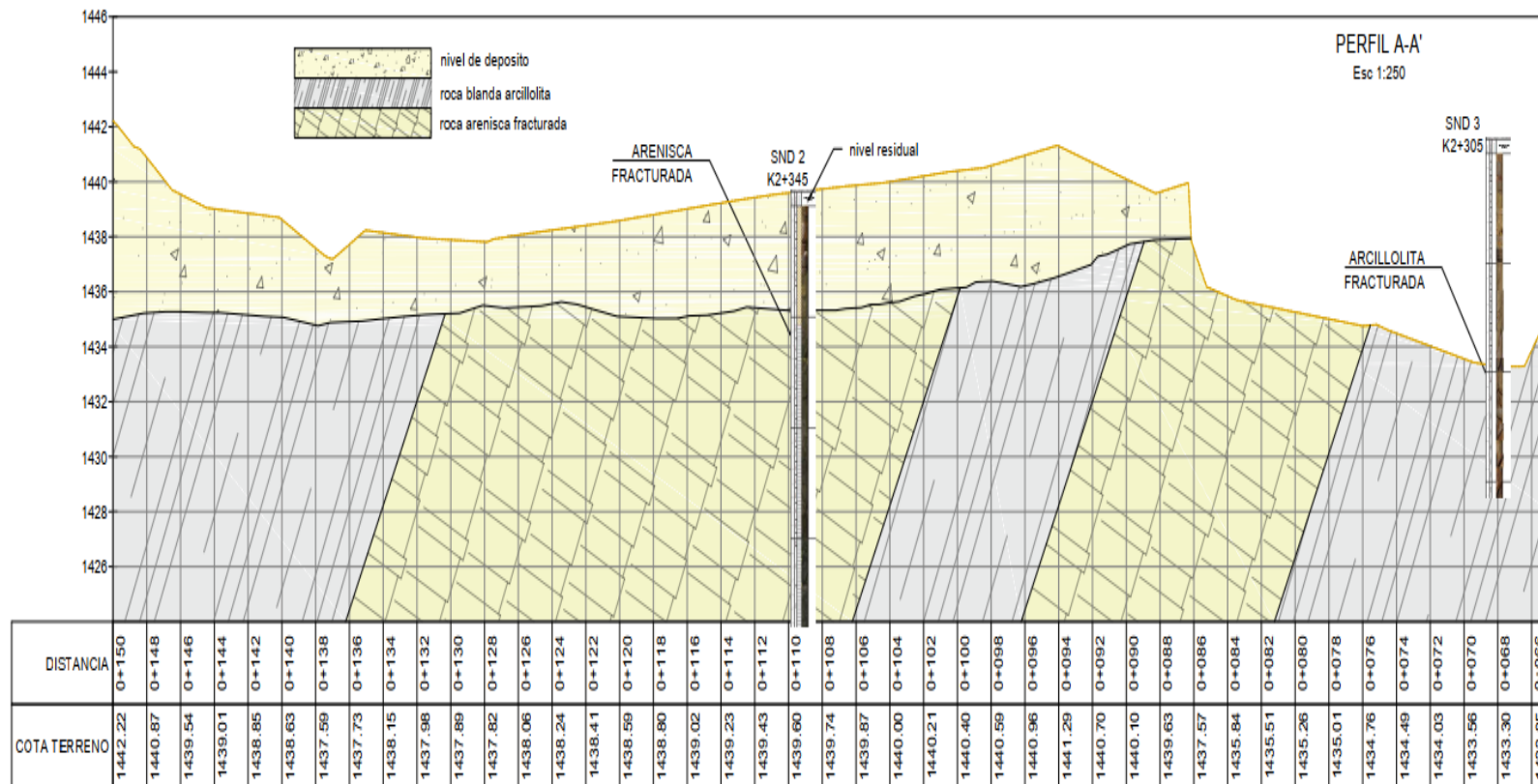
*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 12. Sondeos mecánicos realizados en el sitio crítico.*

Absc	ID Sondeo	Prof [m]	Este	Norte	Objetivo
2+305	SND-2	12.50	843640.333	1300445.918	Punto Critico
2+345	SND-3	15.00	843608.329	1300469.525	Punto Critico

*Fuente: Elaboración propia*

Figura 33 Perfil estratégico



Fuente: Elaboración propia

La información detallada referente a los ensayos de laboratorio realizados para las muestras de suelo obtenidas de la zona de estudio se encuentra en los Anexos.

## 12.2 Ensayos geofísicos

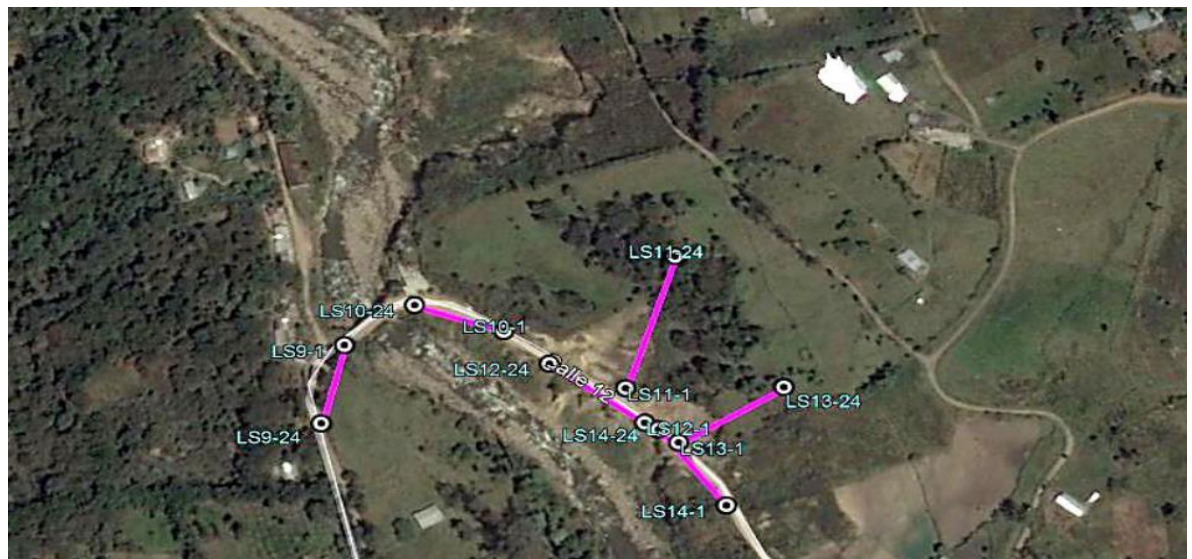
El estudio de refracción sísmica se desarrolló en la vía entre los municipios de Toledo y Labateca en el departamento de Norte de Santander. A continuación, se presentan las coordenadas y una descripción relativa del trazado de las líneas de refracción sísmica y los sondeos eléctricos verticales.

Tabla 13 Resumen localización líneas de refracción sísmica

Abscisa	ID-LRS	Long. [m]	Observación
2+260	LRS14	60	Punto crítico, paralela a la vía
2+300	LRS13	81	Ladera superior perpendicular a la vía
2+330	LRS12	60	Punto crítico, paralela a la vía
2+340	LRS11	101	Ladera superior perpendicular a la vía

Fuente: Elaboración propia

Figura 34 Imagen satelital con la ubicación de las líneas de refracción sísmica LRS14, LRS13, LRS12 y LRS11.



Fuente: Elaboración propia a partir de GPS, Map 60CSx Garmin

De acuerdo con lo descrito en la metodología, se ejecutaron ensayos de refracción sísmica en el área de influencia del talud en estudio K2+250.

La información detallada referente a los ensayos geofísicos realizados en la zona de estudio.

### 12.2.1.1 Interpretación de resultados LRS 11

LOCALIZACIÓN: K02+350/ Perpendicular / Talud Superior / Vía Toledo-Labateca/ Norte de Santander.

LONGITUD DEL TENDIDO: 101.2 metros

ESPACIAMIENTO ENTRE GEOFONOS: 4.4 metros

PROFUNDIDAD INVESTIGADA: 33 m

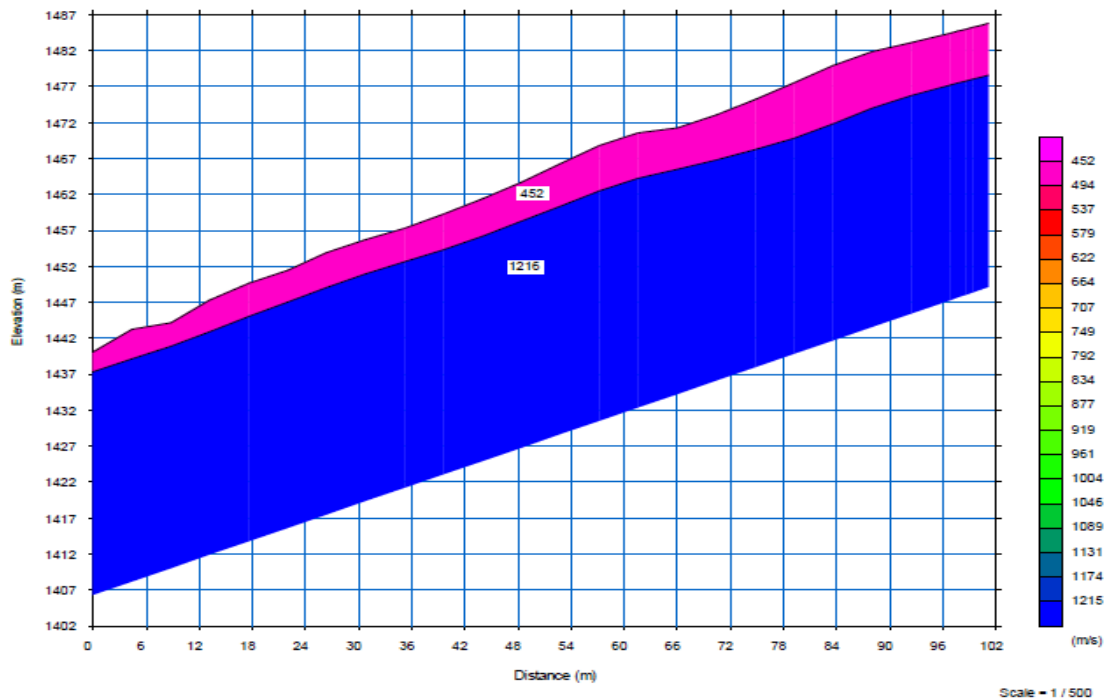
TERRENO: Pendiente - Ondulado

#### COORDENADAS:

Geófono No 1 = X= 1'300.469 Y= 843.616 Z= 1440 msnm

Geófono No 24 = X= 1'300.550 Y= 843.645 Z= 1485 msnm

Figura 35. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 11.

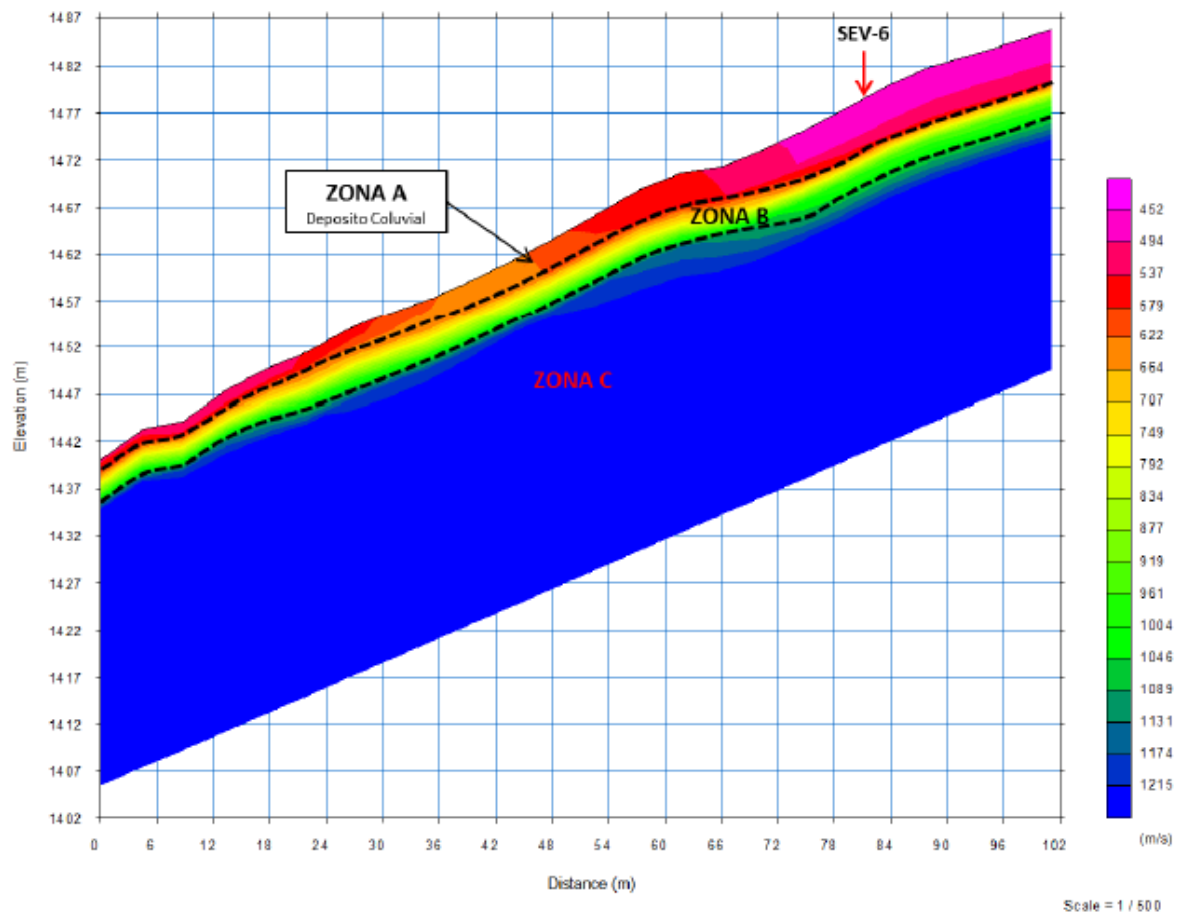


Fuente: Métodos de prospección Geofísica

El perfil sísmico mostrado en la figura 34 corresponde a la línea de refracción sísmica LS 11, presenta un modelo de dos capas:

La primera capa con velocidad de onda compresional ( $V_p$ ) de 452 m/s corresponde a un depósito Cuaternario de tipo Coluvial y la segunda capa con velocidades de onda compresional ( $V_p$ ) de 1216 m/s, corresponde a un basamento terciario fracturado, compuesto predominantemente por areniscas con intercalaciones de lutitas carbonosas correlacionable con la formación Mirador (Pmg).

Figura 36. Tomografía 2D obtenida de la LRS 11.



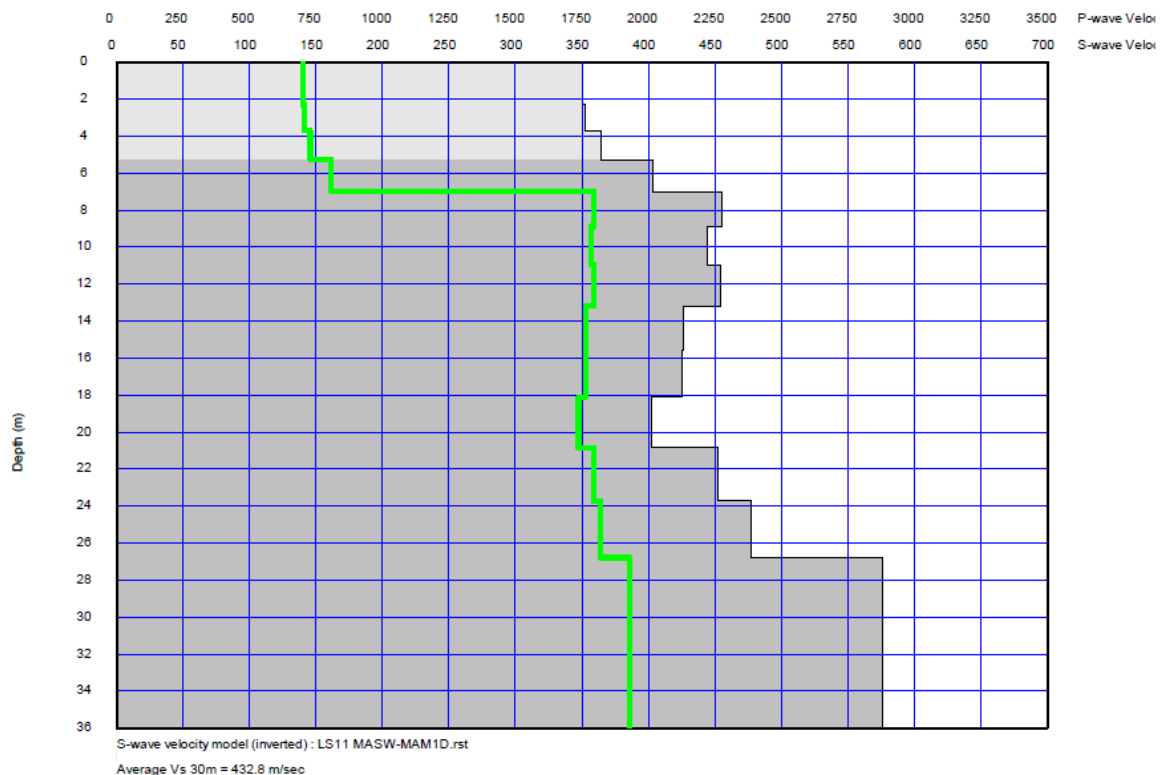
Fuente: Métodos de prospección Geofísica

La imagen de Tomografía Sísmica LS 11 presenta un modelo detallado calculado por elementos finitos, el cual permite observar más de 10 capas que muestran la

variación de la velocidad con la profundidad, muy útil para la identificación de anomalías geofísicas importantes.

De acuerdo a los resultados de la tomografía sísmica LS 11 se identifica tres zonas: La ZONA A corresponde a un Depósito Coluvial con un espesor entre los 1.0 y 5.0 metros aproximadamente a lo largo del perfil sísmico, la ZONA B corresponde a un Basamento Terciario fracturado y meteorizado con un espesor que varía entre 3.0 y 4.0 metros aproximadamente. La ZONA C corresponde a un basamento Terciario, su comportamiento a lo largo del perfil es casi homogéneo, sus propiedades Geomecánicas van mejorando a medida que su profundidad es mayor, no presenta anomalías considerables. Se estima que su profundidad máxima desde la superficie es de 9.0 metros aproximadamente.

Figura 37. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS11.



Fuente: Métodos de prospección Geofísica

Tabla 14. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS11.

Depth (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (Ton/m <sup>3</sup> )	N	Relacion de Poisson v	Módulo de Corte G (MPa)	Módulo de Elasticidad Ed (MPa)	Deformación K (MPa)	Qadm (Ton/m <sup>2</sup> )
0,00	349,96	699,92	1,51	59,52	0,33	185	495	495	13,25
1,07	349,98	699,96	1,51	59,53	0,33	185	495	495	13,25
2,31	352,50	705,00	1,52	60,91	0,33	188	502	502	13,36
3,71	364,03	728,06	1,52	67,48	0,33	202	539	539	13,87
5,27	403,46	806,92	1,55	93,63	0,33	253	674	674	15,66
7,01	454,74	1794,76	1,88	137,06	0,47	389	1140	5538	21,38
8,90	444,21	1783,08	1,88	127,21	0,47	370	1086	5473	20,84
10,96	454,37	1794,36	1,88	136,71	0,47	388	1138	5536	21,36
13,19	426,31	1763,21	1,87	111,59	0,47	340	999	5362	19,94
15,58	424,99	1761,73	1,87	110,49	0,47	338	992	5354	19,87
18,13	402,13	1736,37	1,86	92,66	0,47	301	886	5213	18,72
20,85	452,44	1792,21	1,88	134,87	0,47	385	1128	5524	21,26
23,74	476,71	1819,15	1,89	159,29	0,46	429	1255	5675	22,50
26,79	576,06	1929,42	1,92	291,06	0,45	637	1850	6301	27,66
36,43	682,45	2047,52	1,96	499,35	0,44	911	2619	6985	33,37

Fuente: Métodos de prospección Geofísica

De acuerdo a la tabla de resultados promedio del ensayo de ondas superficiales Masw1D LS 11, el suelo presenta superficialmente una velocidad de onda de corte (Vs) de 349.96 m/s, las cuales varían a medida que su profundidad es mayor hasta alcanzar una velocidad de Onda de Corte (Vs) de 682.45 m/s a 36.43 metros de profundidad.

La velocidad de onda de corte (Vs 30m) promedio para el perfil sísmico es de 432.8 m/s, y según la clasificación de los perfiles de suelos de la tabla A.2.4-1 de la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR10 clasifica el suelo como muy densos o roca blanda que cumplan con el criterio de la onda cortante (Vs) (perfil tipo C).

### 12.2.1.2 Interpretación de resultados LRS 12

LOCALIZACIÓN: K02+340/ Paralela / Talud Inferior / Vía Toledo-Labateca/ Norte de Santander.

LONGITUD DEL TENDIDO: 59.8 metros

ESPACIAMIENTO ENTRE GEOFONOS: 2.6 metros

PROFUNDIDAD INVESTIGADA: 20 m

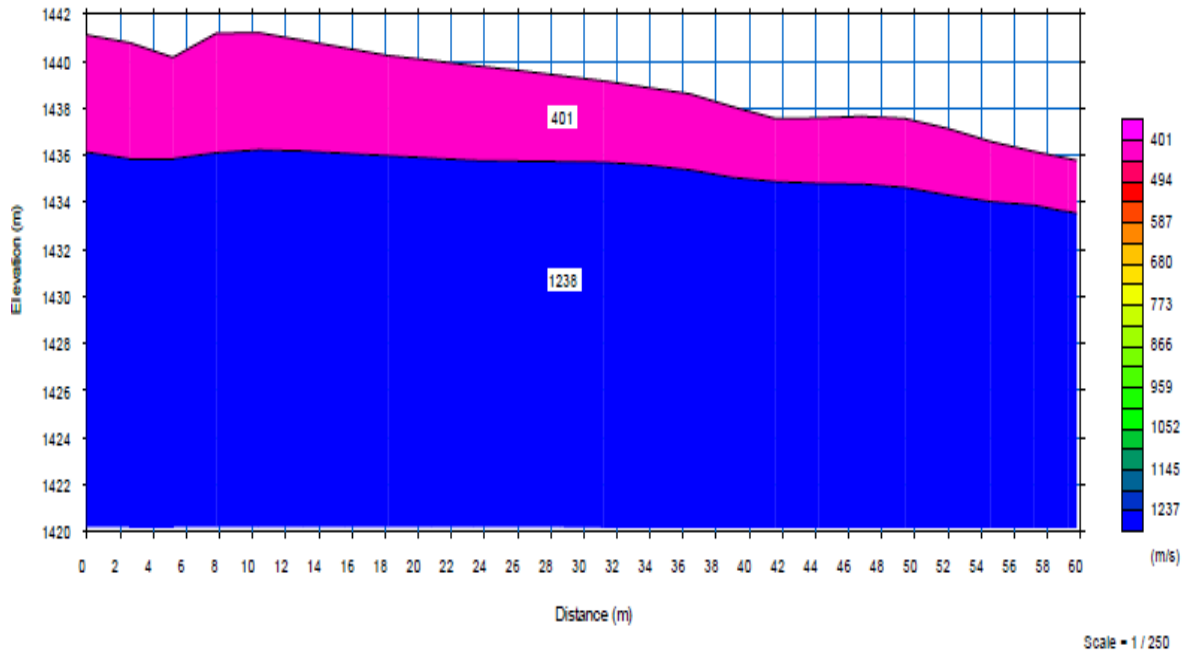
TERRENO: Pendiente - Ondulado

#### COORDENADAS:

Geófono No 1 = X= 1'300.448 Y= 843.625 Z= 1441 msnm

Geófono No 24 = X= 1'300.484 Y= 843.577 Z= 1435 msnm

Figura 38. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 12.

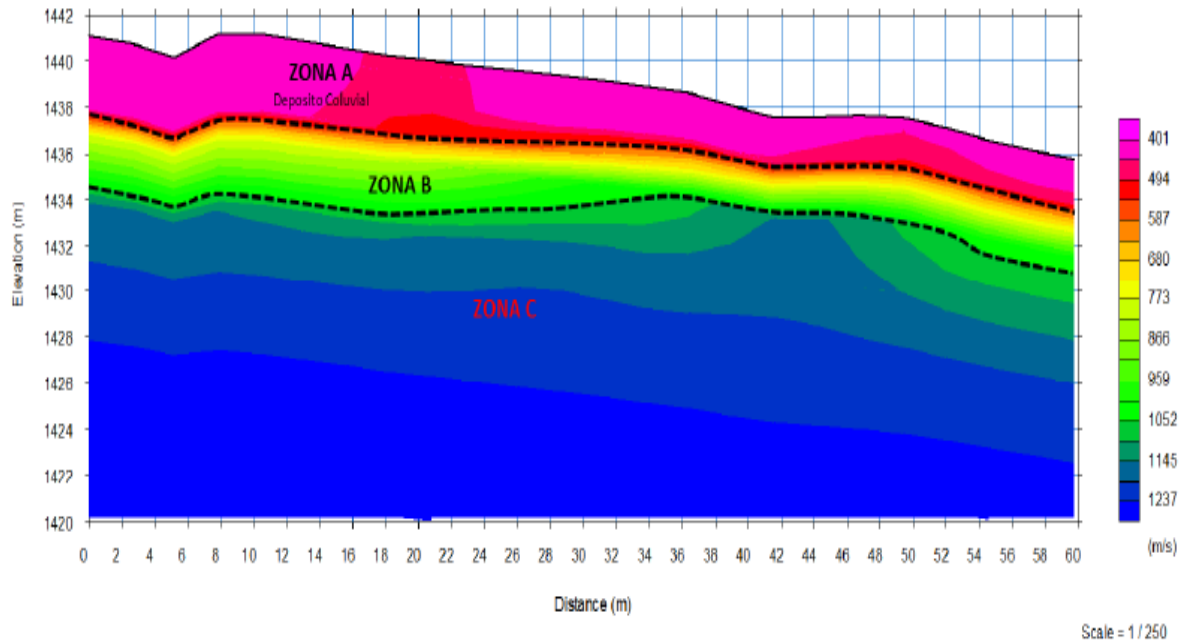


Fuente: Métodos de prospección Geofísica

El perfil sísmico mostrado en la figura 37 corresponde a la línea de refracción sísmica LS 12, presenta un modelo de dos capas:

La primera capa con velocidad de onda compresional ( $V_p$ ) de 401 m/s corresponde a un depósito Cuaternario de tipo Coluvial y la segunda capa con velocidades de onda compresional ( $V_p$ ) de 1238 m/s, corresponde a un basamento terciario fracturado, compuesto predominantemente por areniscas con intercalaciones de lutitas carbonosas correlacionable con la formación Mirador (Pmg).

Figura 39. Tomografía 2D obtenida de la LRS 12.

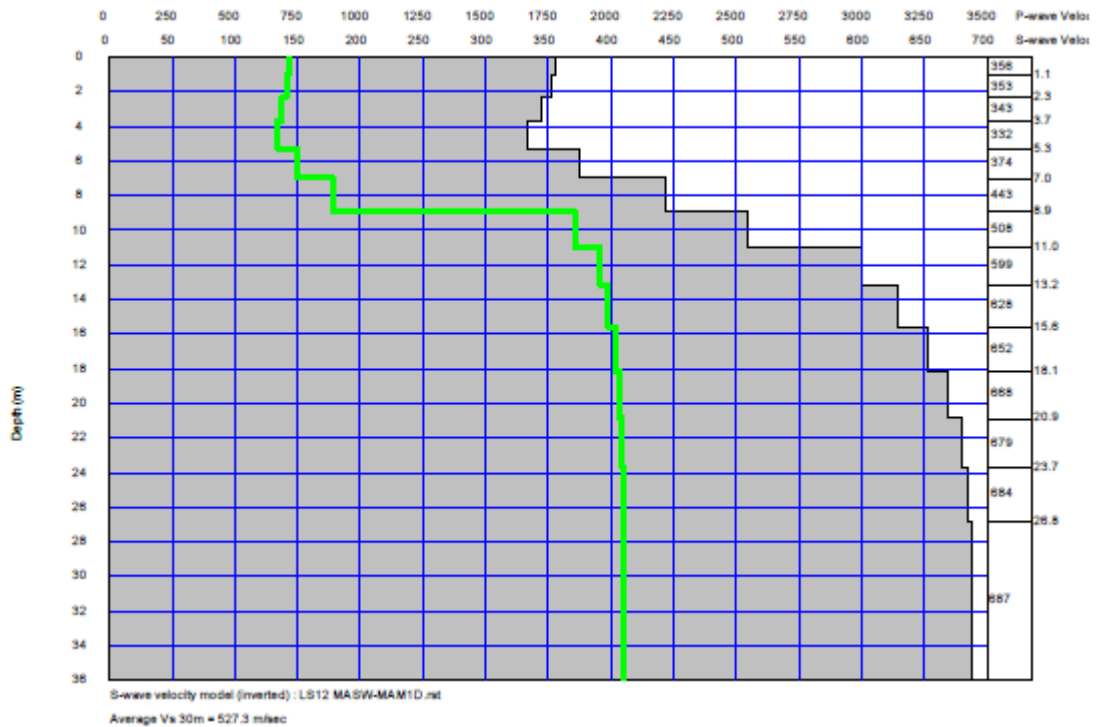


Fuente: Métodos de prospección Geofísica

La imagen de Tomografía Sísmica **LS 12** presenta un modelo detallado calculado por elementos finitos, el cual permite observar más de 10 capas que muestran la variación de la velocidad con la profundidad, muy útil para la identificación de anomalías geofísicas importantes.

De acuerdo a los resultados de la tomografía sísmica LS 12 se identifica tres zonas: La ZONA A corresponde a un Depósito Coluvial con un espesor entre los 2.0 y 3.8 metros aproximadamente a lo largo del perfil sísmico, la ZONA B corresponde a un Basamento Terciario fracturado y meteorizado con un espesor que varía entre 2.8 y 3.4 metros aproximadamente. La ZONA C corresponde a un basamento Terciario, su comportamiento a lo largo del perfil es casi homogéneo, sus propiedades Geomecánicas van mejorando a medida que su profundidad es mayor, no presenta anomalías considerables. Se estima que su profundidad máxima desde la superficie es de 7.0 metros aproximadamente.

Figura 40. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS12.



Fuente: Métodos de prospección Geofísica

Tabla 15. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS12.

Depth (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (Ton/m <sup>3</sup> )	N	Relacion de Poisson v	Módulo de Corte G (MPa)	Módulo de Elasticidad Ed (MPa)	Deformación K (MPa)	qadm (Ton/m <sup>2</sup> )
0,00	356,42	712,84	1,52	63,09	0,33	193	515	515	13,53
1,07	353,09	706,18	1,52	61,23	0,33	189	504	504	13,39
2,31	343,70	687,40	1,51	56,20	0,33	178	476	476	12,97
3,71	332,27	664,53	1,50	50,46	0,33	166	442	442	12,47
5,27	374,83	749,66	1,53	74,07	0,33	215	574	574	14,36
7,01	443,64	887,29	1,58	126,69	0,33	311	830	830	17,54
8,90	508,74	1854,70	1,90	195,93	0,46	491	1434	5875	24,15
10,96	599,89	1955,88	1,93	331,18	0,45	694	2010	6453	28,93
13,19	628,32	1987,43	1,94	383,79	0,44	765	2211	6635	30,44
15,58	652,06	2013,79	1,95	431,92	0,44	827	2385	6788	31,72
18,13	668,98	2032,57	1,95	468,63	0,44	873	2514	6898	32,64
20,85	679,12	2043,82	1,95	491,63	0,44	902	2593	6963	33,19
23,74	684,55	2049,85	1,96	504,25	0,44	917	2635	6999	33,48
26,79	687,48	2053,11	1,96	511,17	0,44	925	2659	7018	33,64
36,43	687,48	2053,11	1,96	511,17	0,44	925	2659	7018	33,64

Fuente: Métodos de prospección Geofísica

De acuerdo a la tabla de resultados promedio del ensayo de ondas superficiales Masw1D LS 12, el suelo presenta superficialmente una velocidad de onda de corte (Vs) de 356.42 m/s, las cuales varían a medida que su profundidad es mayor hasta

alcanzar una velocidad de Onda de Corte ( $V_s$ ) de 687.48 m/s a 36.43 metros de profundidad.

La velocidad de onda de corte ( $V_s$  30m) promedio para el perfil sísmico es de 527.3 m/s, y según la clasificación de los perfiles de suelos de la tabla A.2.4-1 de la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR10 clasifica el suelo como muy densos o roca blanda que cumplan con el criterio de la onda cortante ( $V_s$ ) (perfil tipo C).

### 12.2.1.3 Interpretación de resultados LRS 13

**LOCALIZACIÓN:** K02+290/ Perpendicular/ Talud Superior / Vía Toledo-Labateca/ Norte de Santander.

**LONGITUD DEL TENDIDO:** 80.5 metros

**ESPACIAMIENTO ENTRE GEOFONOS:** 3.5 metros

**PROFUNDIDAD INVESTIGADA:** 27 m

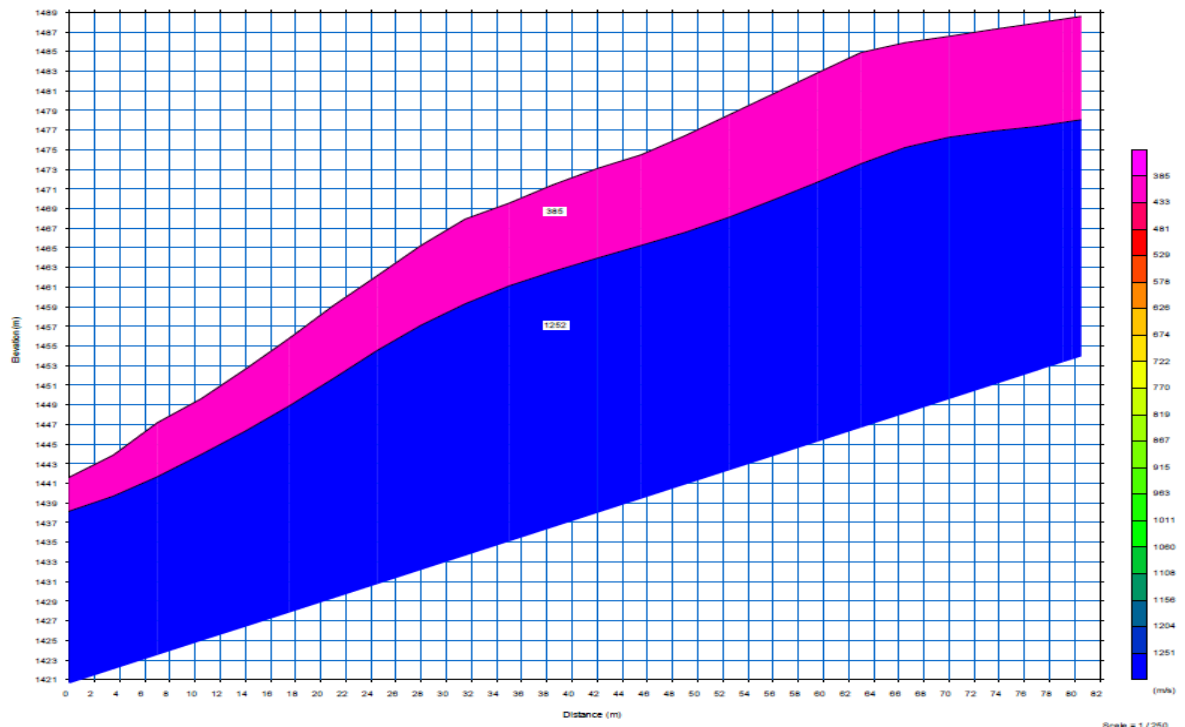
**TERRENO:** Pendiente - Ondulado

#### COORDENADAS:

Geófono No 1 = X= 1'300.436 Y= 843.642 Z= 1441 msnm

Geófono No 24 = X= 1'300.469 Y= 843.698 Z= 1488 msnm

Figura 41. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 13.

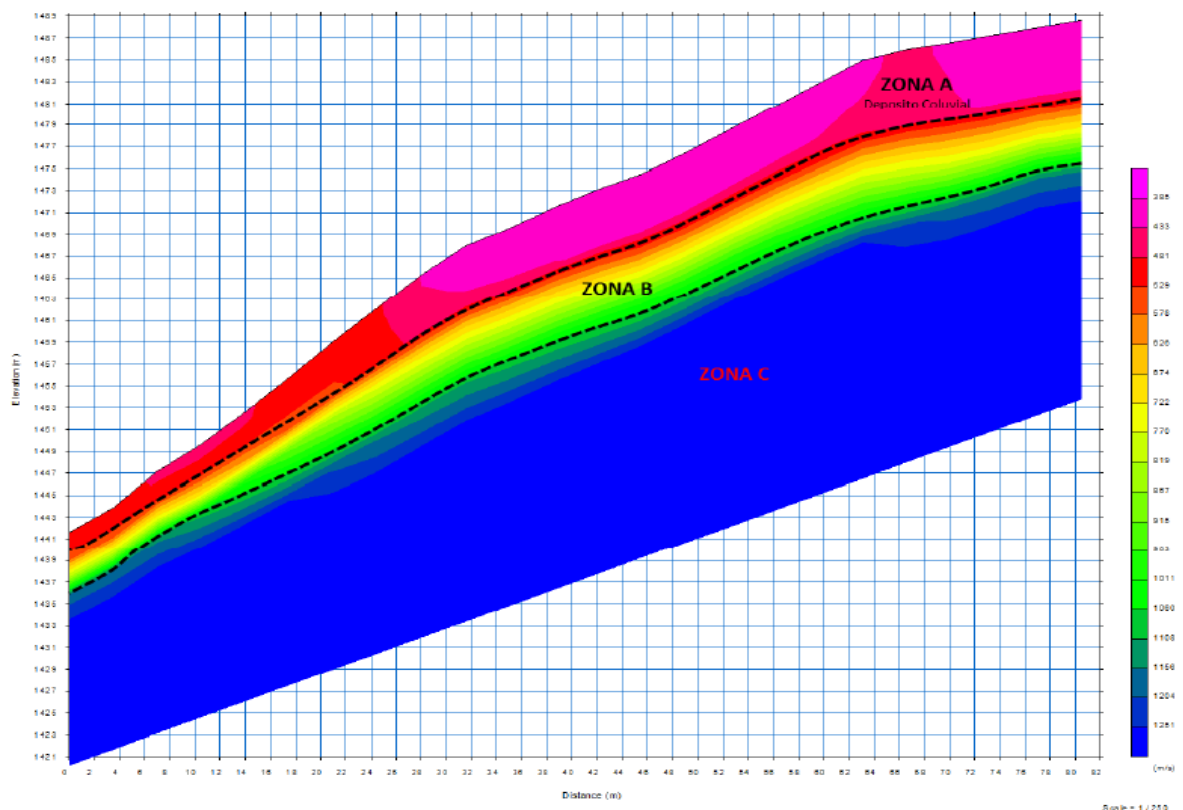


Fuente: Métodos de prospección Geofísica

El perfil sísmico mostrado en la figura 40 corresponde a la línea de refracción sísmica LS 13, presenta un modelo de dos capas:

La primera capa con velocidad de onda compresional ( $V_p$ ) de 385 m/s corresponde a un depósito Cuaternario de tipo Coluvial y la segunda capa con velocidades de onda compresional ( $V_p$ ) de 1252 m/s, corresponde a un basamento terciario fracturado, compuesto predominantemente por areniscas con intercalaciones de lutitas carbonosas correlacionable con la formación Mirador (Pmg).

Figura 42. Tomografía 2D obtenida de la LRS 13.



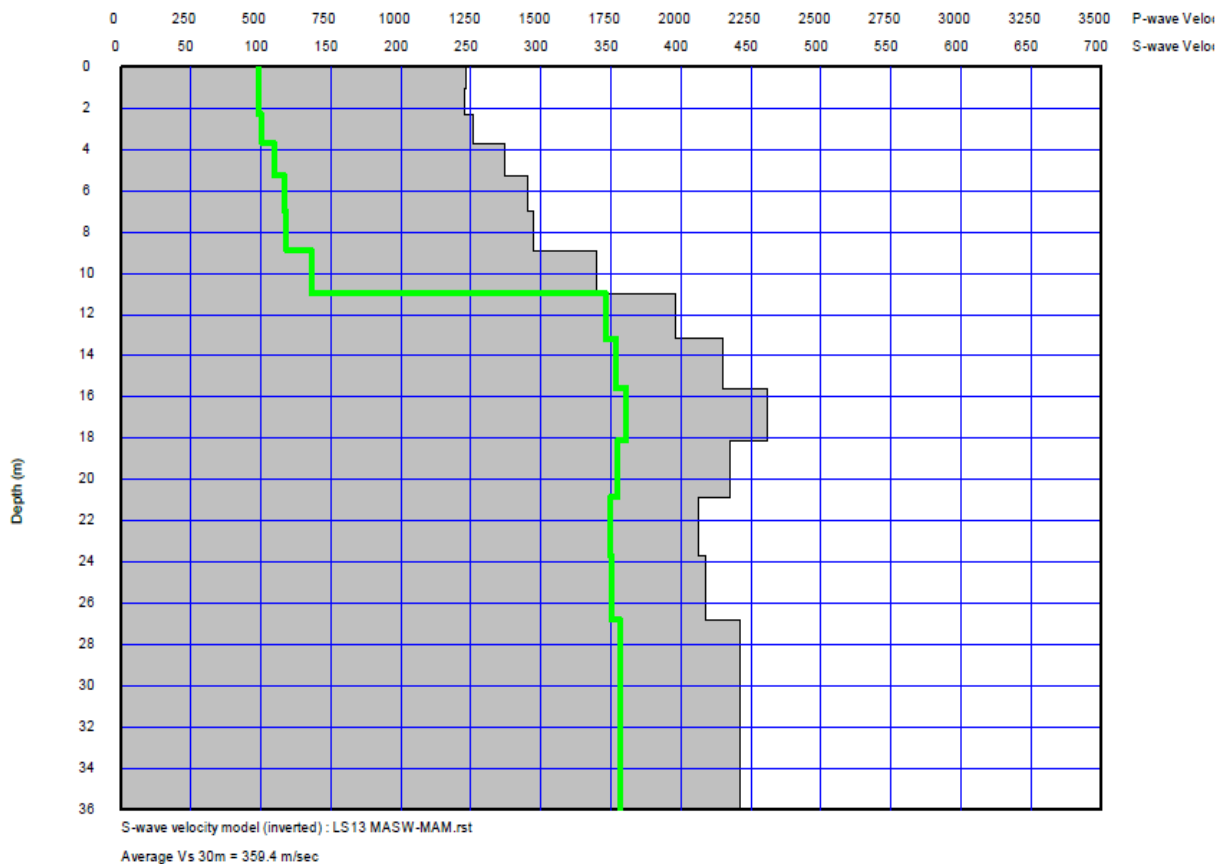
Fuente: *Métodos de prospección Geofísica*

La imagen de Tomografía Sísmica **LS 13** presenta un modelo detallado calculado por elementos finitos, el cual permite observar más de 10 capas que muestran la variación de la velocidad con la profundidad, muy útil para la identificación de anomalías geofísicas importantes.

De acuerdo a los resultados de la tomografía sísmica LS 13 se identifica tres zonas:

La ZONA A corresponde a un Depósito Coluvial con un espesor entre los 1.5 y 7.0 metros aproximadamente a lo largo del perfil sísmico, la ZONA B corresponde a un Basamento Terciario fracturado y meteorizado con un espesor que varía entre 3.0 y 7.0 metros aproximadamente. La ZONA C corresponde a un basamento Terciario, su comportamiento a lo largo del perfil es casi homogéneo, sus propiedades Geomecánicas van mejorando a medida que su profundidad es mayor, no presenta anomalías considerables. Se estima que su profundidad máxima desde la superficie es de 14.0 metros aproximadamente.

Figura 43. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS13.



Fuente: Métodos de prospección Geofísica

Tabla 16. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS13.

Depth (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (Ton/m <sup>3</sup> )	N	Relacion de Poisson v	Módulo de Corte G (MPa)	Módulo de Elasticidad Ed (MPa)	Deformación K (MPa)	Qadm (Ton/m <sup>2</sup> )
0,00	245,88	491,75	1,44	19,34	0,33	87	232	232	8,84
1,07	245,76	491,52	1,44	19,31	0,33	87	232	232	8,83
2,31	251,23	502,46	1,44	20,71	0,33	91	243	243	9,05
3,71	273,83	547,65	1,46	27,25	0,33	109	292	292	9,98
5,27	290,77	581,53	1,47	32,99	0,33	124	332	332	10,69
7,01	294,40	588,81	1,47	34,32	0,33	128	341	341	10,85
8,90	339,60	679,20	1,51	54,09	0,33	174	463	463	12,79
10,96	395,91	1729,46	1,86	88,17	0,47	292	859	5175	18,41
13,19	429,42	1766,66	1,87	114,21	0,47	345	1014	5381	20,09
15,58	461,07	1801,79	1,88	143,23	0,46	400	1172	5577	21,70
18,13	434,26	1772,02	1,87	118,35	0,47	353	1037	5411	20,34
20,85	412,24	1747,59	1,87	100,28	0,47	317	933	5275	19,23
23,74	416,91	1752,77	1,87	103,94	0,47	325	954	5304	19,46
26,79	442,32	1780,98	1,88	125,50	0,47	367	1077	5461	20,75
36,43	635,52	1995,42	1,94	397,97	0,44	784	2263	6682	30,83

Fuente: Métodos de prospección Geofísica

De acuerdo a la tabla de resultados promedio del ensayo de ondas superficiales Masw1D LS 13, el suelo presenta superficialmente una velocidad de onda de corte (Vs) de 245.88 m/s, las cuales varían a medida que su profundidad es mayor hasta alcanzar una velocidad de Onda de Corte (Vs) de 635.52 m/s a 36.43 metros de profundidad.

La velocidad de onda de corte (Vs 30m) promedio para el perfil sísmico es de 359.4 m/s, y según la clasificación de los perfiles de suelos de la tabla A.2.4-1 de la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR10 clasifica el suelo como muy densos o roca blanda que cumplan con el criterio de la onda cortante (Vs) (perfil tipo C).

#### 12.2.1.4 Interpretación de resultados LRS 14

LOCALIZACIÓN: K02+260/ Paralela / Talud Inferior / Vía Toledo-Labateca/ Norte de Santander.

LONGITUD DEL TENDIDO: 59.8 metros

ESPACIAMIENTO ENTRE GEOFONOS: 2.6 metros

PROFUNDIDAD INVESTIGADA: 20 m

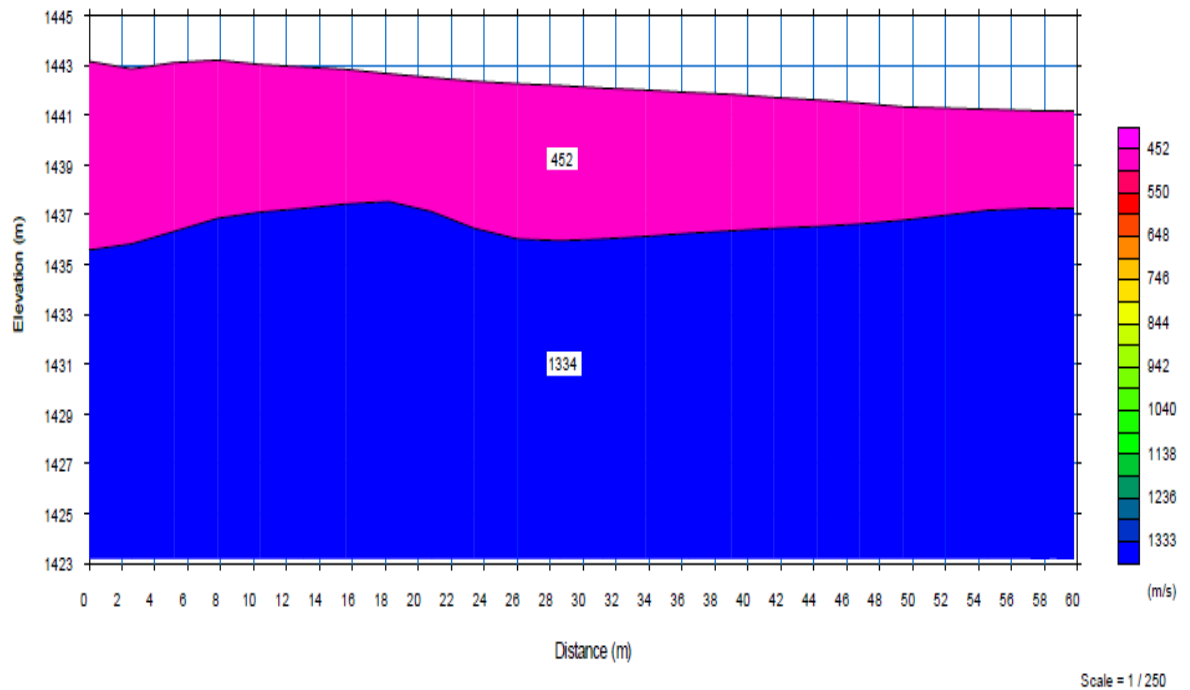
TERRENO: Pendiente - Ondulado

#### COORDENADAS:

Geófono No 1 = X= 1'300.398 Y= 843.665 Z= 1443 msnm

Geófono No 24 = X= 1'300.444 Y= 843.632 Z= 1441 msnm

Figura 44. Modelo simplificado de 2 capas obtenido a partir de la LRS 14.

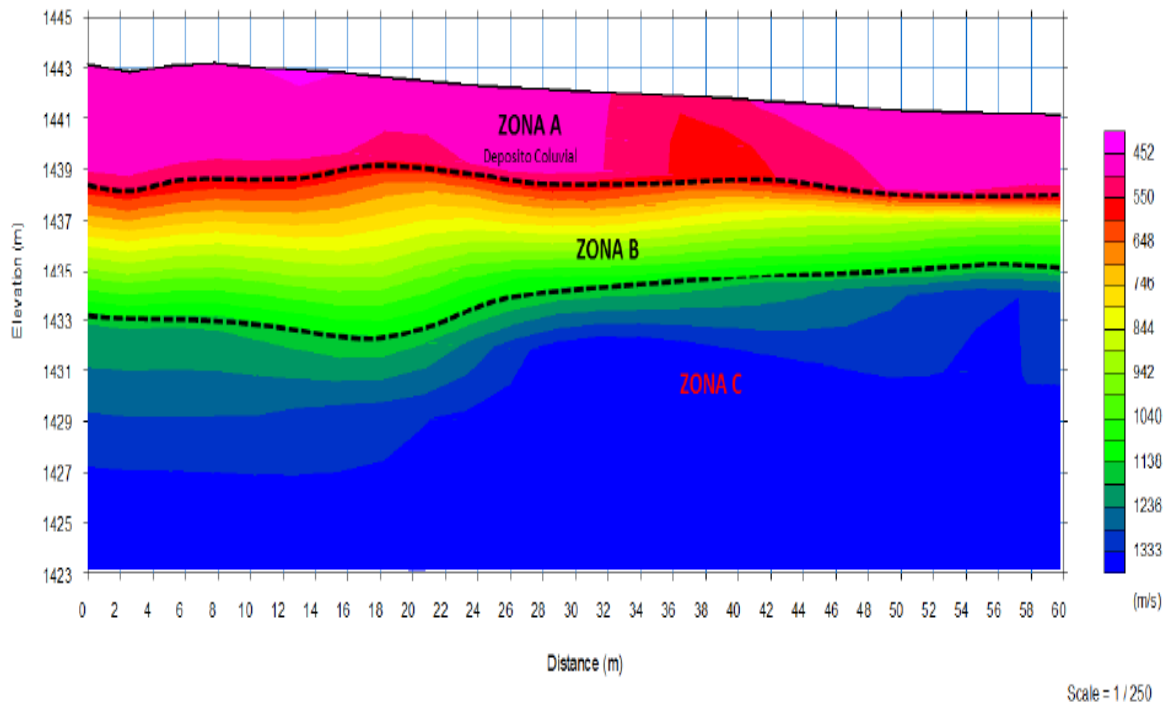


Fuente: Métodos de prospección Geofísica

El perfil sísmico mostrado en la figura 43 corresponde a la línea de refracción sísmica LS 14, presenta un modelo de dos capas:

La primera capa con velocidad de onda compresional ( $V_p$ ) de 452 m/s corresponde a un depósito Cuaternario de tipo Coluvial y la segunda capa con velocidades de onda compresional ( $V_p$ ) de 1334 m/s, corresponde a un basamento terciario fracturado, compuesto predominantemente por areniscas con intercalaciones de lutitas carbonosas correlacionable con la formación Mirador (Pmg).

Figura 45. Tomografía 2D obtenida de la LRS 14.

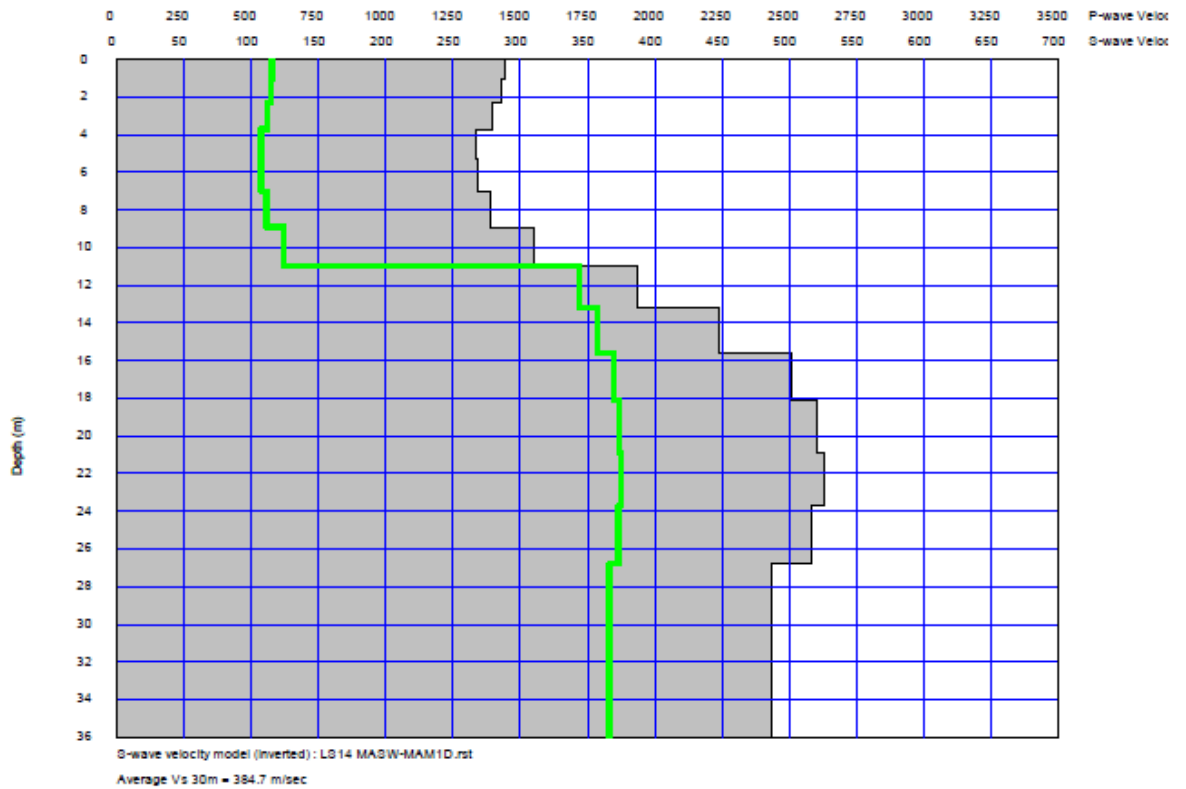


Fuente: Métodos de prospección Geofísica

La imagen de Tomografía Sísmica LS 14 presenta un modelo detallado calculado por elementos finitos, el cual permite observar más de 10 capas que muestran la variación de la velocidad con la profundidad, muy útil para la identificación de anomalías geofísicas importantes.

De acuerdo a los resultados de la tomografía sísmica LS 14 se identifica tres zonas: La ZONA A corresponde a un Depósito Coluvial con un espesor entre los 3.0 y 4.6 metros aproximadamente a lo largo del perfil sísmico, la ZONA B corresponde a un Basamento Terciario fracturado y meteorizado con un espesor que varía entre 2.8 y 7.0 metros aproximadamente. La ZONA C corresponde a un basamento Terciario, su comportamiento a lo largo del perfil es casi homogéneo, sus propiedades Geomecánicas van mejorando a medida que su profundidad es mayor, no presenta anomalías considerables. Se estima que su profundidad máxima desde la superficie es de 10.4 metros aproximadamente.

Figura 46. Perfil de velocidad de ondas superficiales MSW 1D obtenido de la LRS14.



Fuente: Métodos de prospección Geofísica

Tabla 17. Datos obtenidos del ensayo de ondas superficiales MASW 1D LRS14.

Depth (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (Ton/m <sup>3</sup> )	N	Relacion de Poisson v	Módulo de Corte G (MPa)	Módulo de Elasticidad Ed (MPa)	Deformación K (MPa)	qadm (Ton/m <sup>2</sup> )
0,00	288,42	576,83	1,47	32,15	0,33	122	326	326	10,59
1,07	285,53	571,07	1,47	31,14	0,33	120	319	319	10,47
2,31	279,45	558,91	1,46	29,07	0,33	114	305	305	10,22
3,71	267,40	534,80	1,45	25,27	0,33	104	277	277	9,72
5,27	268,00	536,00	1,45	25,45	0,33	104	278	278	9,74
7,01	278,13	556,27	1,46	28,64	0,33	113	301	301	10,16
8,90	310,47	620,93	1,49	40,65	0,33	143	382	382	11,53
10,96	387,04	1719,62	1,86	82,03	0,47	278	820	5121	17,97
13,19	447,83	1787,09	1,88	130,54	0,47	377	1105	5495	21,02
15,58	501,24	1846,38	1,90	186,88	0,46	476	1391	5828	23,76
18,13	520,32	1867,56	1,90	210,50	0,46	515	1502	5948	24,75
20,85	525,68	1873,51	1,90	217,48	0,46	526	1534	5982	25,02
23,74	516,51	1863,33	1,90	205,63	0,46	507	1479	5924	24,55
26,79	486,82	1830,37	1,89	170,29	0,46	448	1310	5738	23,02
36,43	525,68	1873,51	1,90	217,48	0,46	526	1534	5982	25,02

Fuente: Métodos de prospección Geofísica

De acuerdo a la tabla de resultados promedio del ensayo de ondas superficiales Masw1D LS 14, el suelo presenta superficialmente una velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) de 288.42 m/s, las cuales varían a medida que su profundidad es mayor hasta alcanzar una velocidad de Onda de Corte ( $V_s$ ) de 525.68 m/s a 36.43 metros de profundidad.

La velocidad de onda de corte ( $V_s$  30m) promedio para el perfil sísmico es de 384.7 m/s, y según la clasificación de los perfiles de suelos de la tabla A.2.4-1 de la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR10 clasifica el suelo como muy densos o roca blanda que cumplan con el criterio de la onda cortante ( $V_s$ ) (perfil tipo C).

### **12.3 ENSAYOS DE LABORATORIO Y CAMPO**

En este apartado se presenta los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, teniendo en cuenta la clasificación adoptada para cada capa del suelo, así como los parámetros mecánicos de resistencia para establecer el comportamiento que va a presentar el suelo con las condiciones del sector.

#### **12.3.1 Ensayos De Campo**

En campo se ha realizado el ensayo de penetración estándar o por sus siglas en inglés ensayo SPT.

Los ensayos de penetración estándar propuestos se realizaron utilizando la norma ASTM D 1586, equivalente a la norma I.N.V.E. 111. El equipo a utilizar presenta las siguientes especificaciones:

- Peso del martillo: 140 libras
- Altura de caída: 76 centímetros
- Penetración: 3 intervalos de 15 centímetros cada uno (6")
- N de diseño: Sumatoria de los golpes de los últimos 30 centímetros (12")
- Diámetro exterior del tubo: 50.8 mm.
- Diámetro interior del muestreador en la punta: 34.93 mm

- Longitud del tubo: 75 centímetros.
- Sistema de hincado: Manual
- Rechazo: Más de 50 golpes para 15 centímetros (6"). 100 golpes para incrementos de 30 centímetros (12"). 10 golpes sucesivos sin avance del tubo de penetración.

El método ha sido estandarizado desde 1958, con varias revisiones (ASTM D-1586) y consiste en hincar una toma muestras partido de 18" (45cm) de largo colocado al extremo de una varilla AW, por medio de un peso (martillo) de 140lb (63.5kg) que se deja caer "libremente" desde una altura de 30" (76cm), anotando los golpes necesarios para penetrar cada 6" (15cm) (Bowles,1988).

Durante la ejecución de los sondeos se tomaron muestras de cada estrato encontrado, obtenidas a través de la cuchara partida (Split Spoon). Cada muestra se clasificó visualmente en campo, rotuló y empacó para su transporte al laboratorio.

### **12.3.2 Ensayos De Laboratorio**

Sobre las muestras llevadas al laboratorio se procede a realizar los ensayos de caracterización físico-mecánica que permitan obtener parámetros geotécnicos de manera cuantitativa. Dichos parámetros son empleados en la fase de análisis y diseño de las obras geotecnicas requeridas en el proyecto.

1. Humedad Natural: Consiste en la determinación, en condiciones de laboratorio, del contenido de agua (humedad) del suelo expresado en peso. El contenido de agua del material se define según la norma ASTM D 2216 y INV E-122.
2. Límites de Atterberg: Este ensayo se refiere a la determinación del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos. Se realiza según la norma ASTM D 4318 – AASHTO T 89-90 y I.N.V.E. 126
3. Análisis granulométrico por tamizado: Este ensayo tiene por objetivo determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas

de un suelo. Las especificaciones para la ejecución del presente ensayo se encuentran en la norma ASTM D422-63 – AASHTO T88 y I.N.V.E.123.

4. Clasificación del suelo: Aplicando la norma ASTM D2487-00 se realiza la clasificación mineral y orgánica de los suelos para propósitos de ingeniería basada en ensayos de caracterización del tamaño del grano y límites de plasticidad.

### **13 CARACTERIZACIÓN Y MODELO GEOTÉCNICO DEL TALUD EN ESTUDIO**

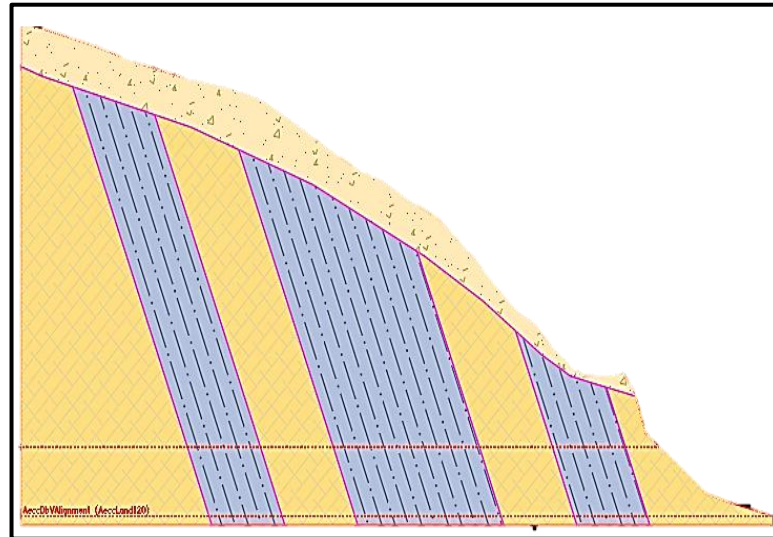
Para la definición de los parámetros geotécnicos de los materiales reportados en la exploración del subsuelo, se emplearon los diversos resultados de los ensayos de corte directo, compresión inconfiada; así mismo, se tuvo en cuenta la información obtenida de los ensayos realizados en campo. De acuerdo con lo anterior, en este apartado se presenta la caracterización mecánica de cada uno de los estratos o niveles de los materiales presentes en el subsuelo del área de influencia del talud en estudio, así como el perfil topográfico del talud con la estratigrafía correspondiente para la posterior realización del análisis de estabilidad bajo diferentes escenarios.

#### **13.1 CONDICIONES DE PERFIL INICIAL DE TALUD**

El talud estudiado contempla una composición geotécnica mecánicamente inestable donde los deslizamientos de tierra y la falta de drenaje son evidentes, creando áreas altamente susceptibles a la degradación y debilidad en la superficie. Lo anterior puede describirse a razón de presencia de rocas pelíticas, como la arcilla, que exhiben un comportamiento desfavorable cuando se exponen al entorno circundante debido a su composición arcillosa y su sensibilidad a la humedad. Los taludes compuestos por este tipo de rocas, que sufren procesos de inestabilidad debido a su degradación acelerada, requieren del respectivo análisis de riesgo, empleando métodos que permitan determinar de manera efectiva los niveles de

cambios físicos y mecánicos como el uso de software, próximamente evidenciado, adquiriendo una decisión sobre su protección y mitigación adecuadas y evitar necesitar accidentalmente tiempo de exposición.

Figura 47 Condiciones iniciales de talud, perfil de análisis (Perfil 3)



Fuente: Elaboración propia

### 13.1.1 Caracterización estratigráfica de la zona

El talud cuenta con tres estratos principalmente destacados, se menciona cuantificaciones dependientes a sondeos específicos con evidencia de variedad a razón de la geología de los estratos. Las especificaciones descritas refieren a las implementadas en los modelos de estabilidad que relacionan parámetros efectivos conforme a Mohr Coulomb:

- Depósito residual

Es el resultado de la reforma y desprendimiento in situ de macizos rocosos a lo largo del talud. Está compuesto por masas de brechas inestables transportadas poco a poco por la gravedad y el agua. Se trata de un

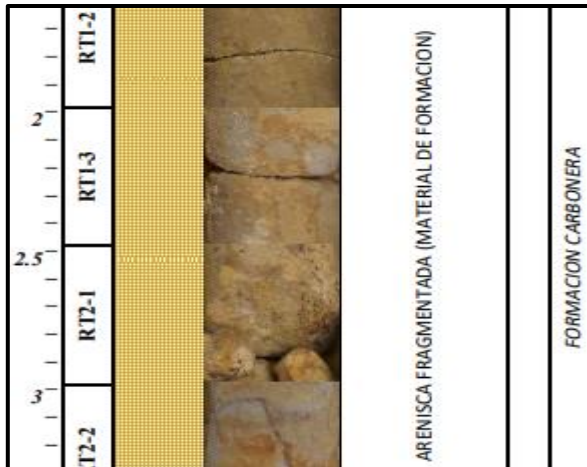
Figura 48 Estrato de depósito Residual



depósito coluvial de arcilla de baja plasticidad con arena, catalogado por USCS como CI (depósito coluvial) con parámetros de resistencia por interpolación para la incorporación del software de peso unitario 14.91 [kN/m<sup>3</sup>], cohesión 1.97 [kN/m<sup>3</sup>] y ángulo de fricción 33°.

- Areniscas

Figura 49 Estrato de areniscas.



Presenta evidencias de endurecimiento como resultado de procesos geológicos, constituido en su mayoría de cuarzo precipitado.

Se obtuvo una formación carbonera de arenisca de grano medio a fino, de color gris amarillento fragmentada como material de formación con parámetros de resistencia por interpolación para la incorporación del

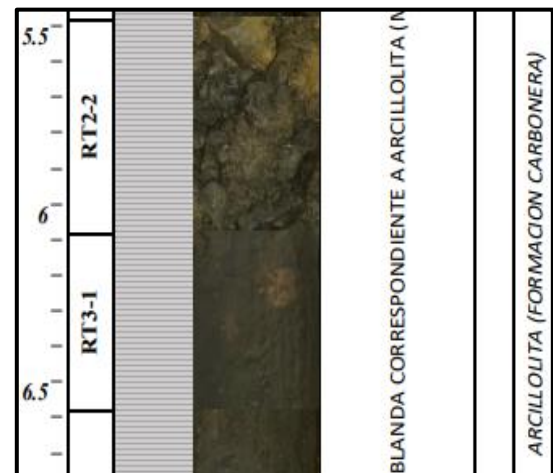
software de peso unitario 21.76 [kN/m<sup>3</sup>], cohesión 98.1 [kN/m<sup>3</sup>] y ángulo de fricción 40°.

- Arcillolitas

Se trata de una roca estratificada con un tamaño de grano no visible a simple cuyos granos están compuestos principalmente por arcilla.

El materia presenta parámetros de resistencia por interpolación para la incorporación del software de peso unitario 23.78 [kN/m<sup>3</sup>], cohesión 294.3 [kN/m<sup>3</sup>] y ángulo de fricción 37°.

Figura 50 Estrato Arcillolitas



## 14 DISEÑO DE OBRAS DE MITIGACIÓN

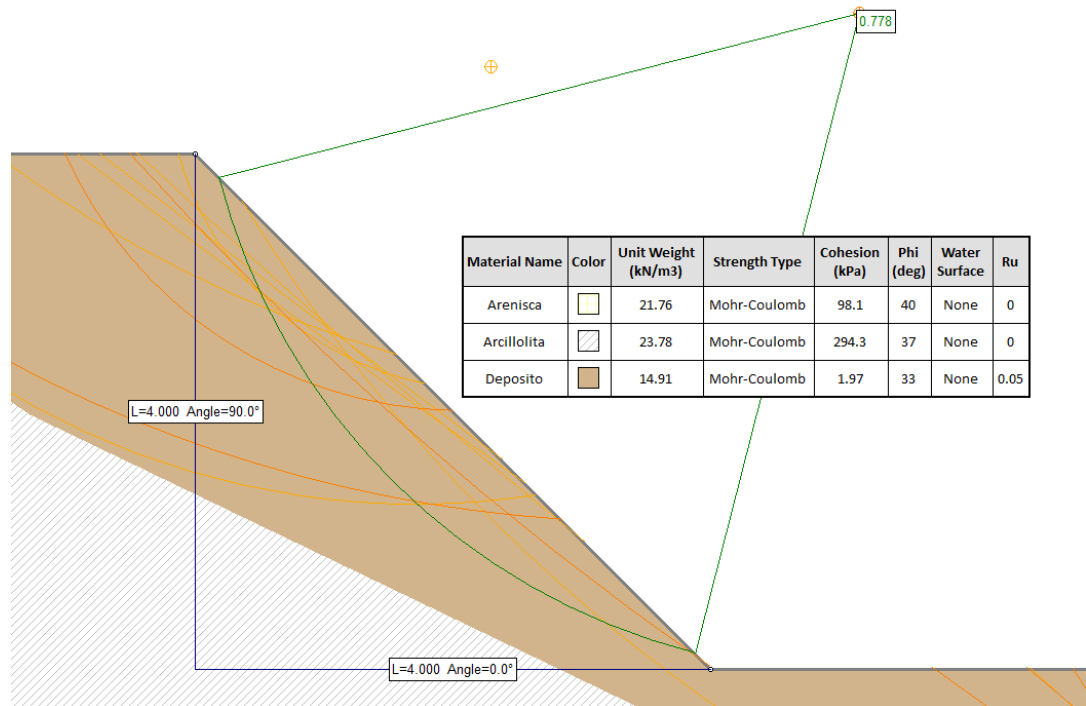
Las soluciones geotécnicas mediante la proyección de obras de contención o mitigación son para el manejo de la amenaza por deslizamientos en un talud.

Para el análisis de las alternativas a plantearse se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos del análisis de estabilidad en Slide, así como los costos que implican el diseño y proyección de cada una y la complejidad de la construcción. De acuerdo a esto, se escoge la más viable tanto técnica como económicamente.

La propuesta de obras intervención para estabilización de los taludes se concentran en 4 enfoques que se listan a continuación:

- Sistema de terrazas y bermas como medida de intersección de cuñas de falla de gran magnitud.

Figura 51 Condiciones iniciales de talud, perfil de análisis (Perfil 3)



Fuente: Elaboración propia

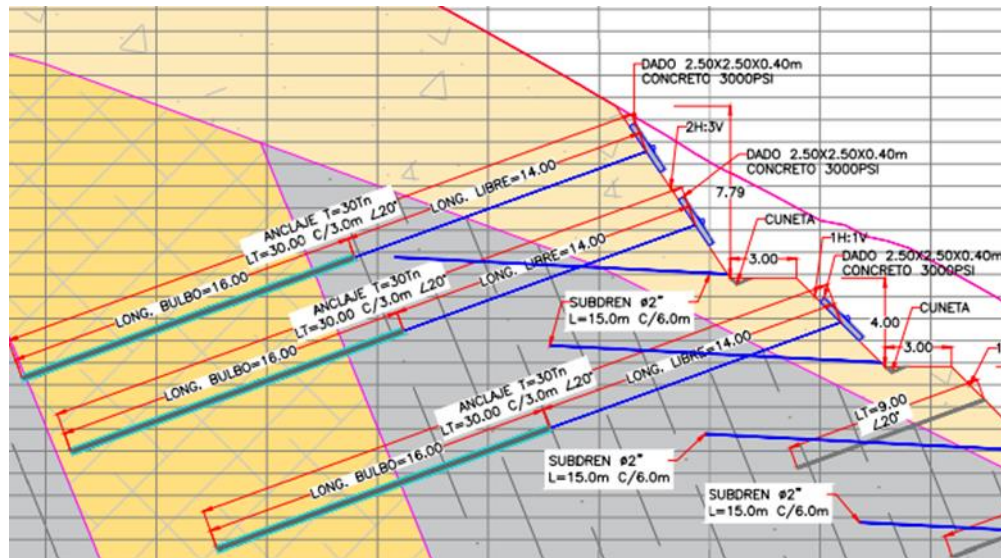
Las terrazas se establecen con una pendiente máxima de 1H:1V, que sin embargo, no son estables sin que se implementen los sistemas de anclaje activos o pasivos. Los factores de seguridad sin estabilización adicional están por el orden de 0.778 en condiciones pseudoestáticas y 1.148 en condiciones estáticas.

- Sistema de anclajes activos: En las terrazas superiores se proponen anclajes activos de 30 ton-f espaciados cada 3.0 metros de longitud total de 30.0 metros inclinados  $20^\circ$  respecto a la horizontal, longitud del bulbo de 16.0 metros desarrollado en estratos rocosos alternado en arcillolitas y/o areniscas.
- Sistema de anclajes pasivos: En las terrazas inferiores se proponen anclajes pasivos de 9.0 metros de longitud, espaciados cada 3.0 m, una inclinación de  $20^\circ$  respecto a la horizontal y una resistencia máxima a la tensión de 192 kN.

Los anclajes cumplen con las siguientes especificaciones:

1. La longitud mínima del bulbo es de 16.0 m en todos los anclajes.
2. Resistencia a la tensión mínima de cada anclaje debe ser de 294 KN (30 toneladas)
3. Los anclajes constan de 6 torones de 3/8" c/u, toron Norma ASTM A416, Grado 250 (1725) Resistencia a la Rotura Mínima del Torón=89.0kN, Carga de Trabajo= $0.6 \cdot f_{pu} \cdot A_{ps}$ =5.4 Toneladas.
4. El diámetro de perforación en los anclajes deber ser de 4".
5. La inyección de los anclajes se hará con lechada de cemento.
6. El concreto de los dados de concreto tendrán una resistencia de 4000 psi a los 28 días.
7. El acero de refuerzo tendrá una resistencia de 60000 psi.

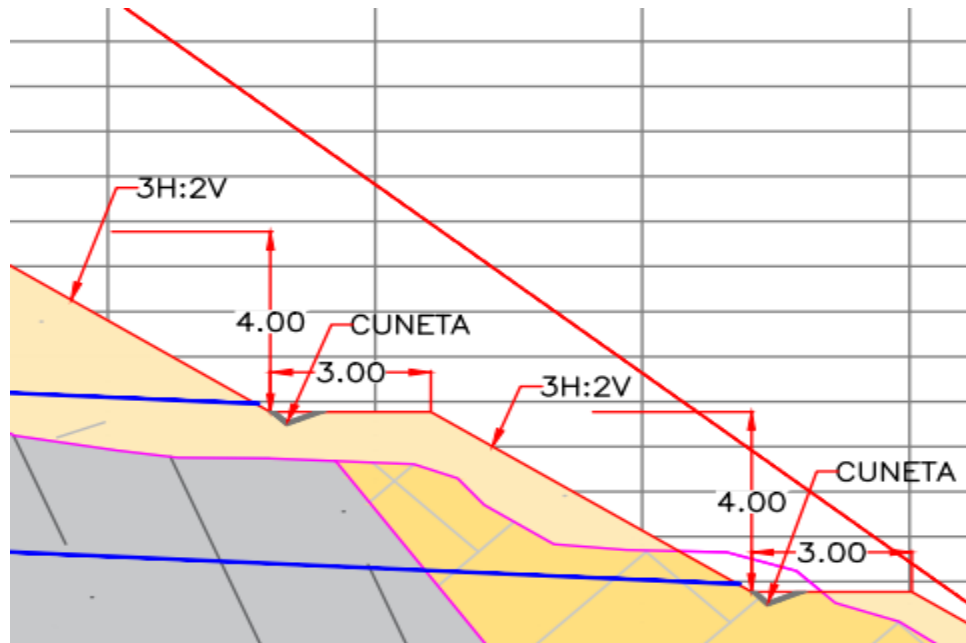
Figura 52. Diseño de anclajes



Fuente: Elaboración propia

- Sistema de drenaje superficial y subsuperficial compuesto por zanjas de coronación, cunetas en las bermas y drenes de penetración de longitud de 20 metros inclinados  $20^\circ$  respecto a la horizontal. Estas medidas se proponen con el objetivo de reducir el agua infiltrada en la masa de suelo que detona movimientos en masa del talud durante eventos de lluvia de alta intensidad.

Figura 53. Diseño de cunetas






Fuente: Elaboración propia

- Revegetalización empleando Biomantos como medida de control contra la erosión del suelo.

## 15 ANALISIS DE ESTABILIDAD-CONDICIÓN ACTUAL

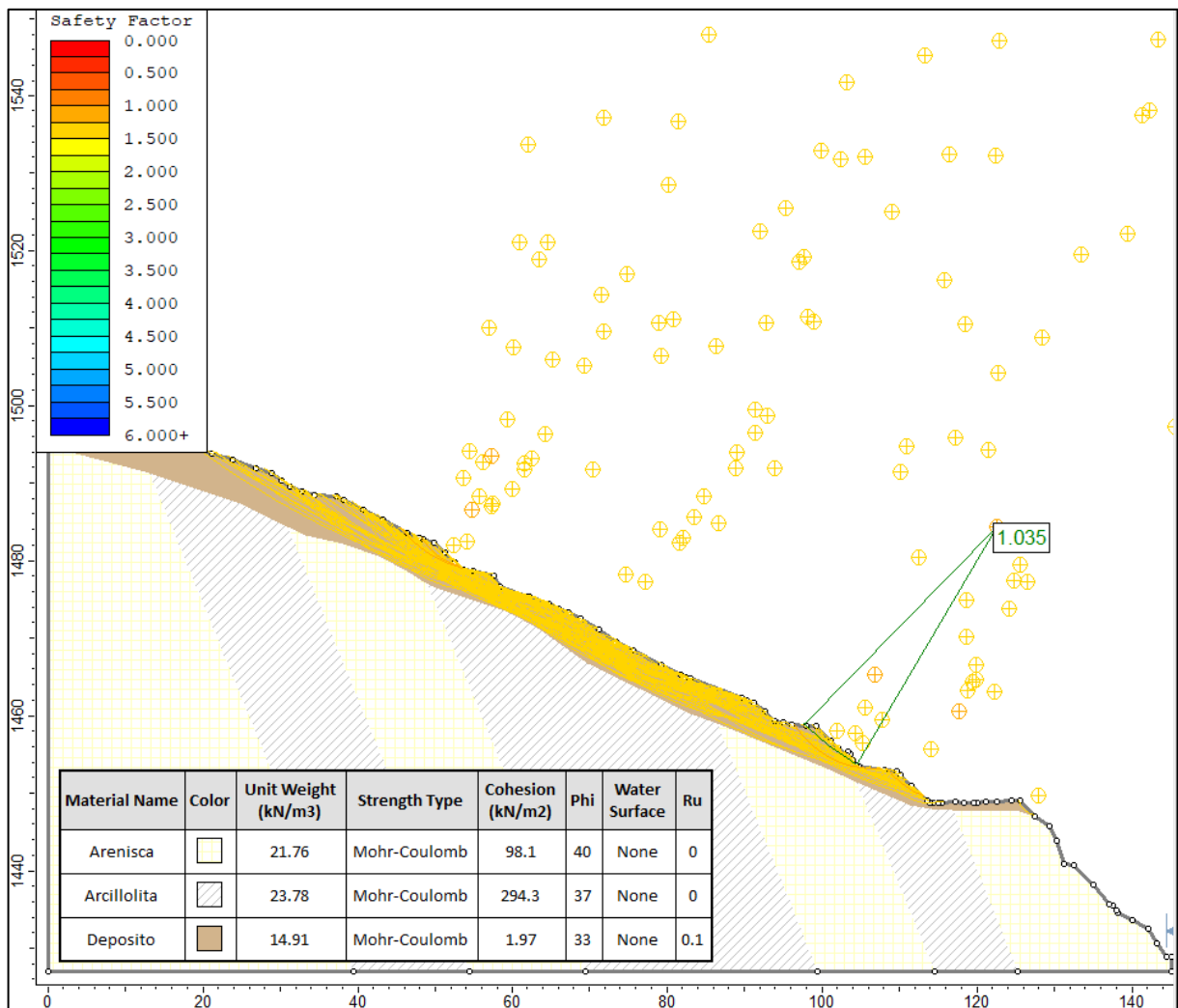
### 15.1 PERFIL DE ANÁLISIS NO.1

Tabla 18 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.1

	Material	Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]	Modelo de resistencia	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Phi [°]	Nivel Freático [m]	Ru [-]
	Deposito	14.91	Mohr-Coulomb	1.97	33	N/A	0.1
	Arenisca	21.76	Mohr-Coulomb	98.1	40	N/A	0.0
	Arcillolita	23.78	Mohr-Coulomb	294.3	37	N/A	0.0

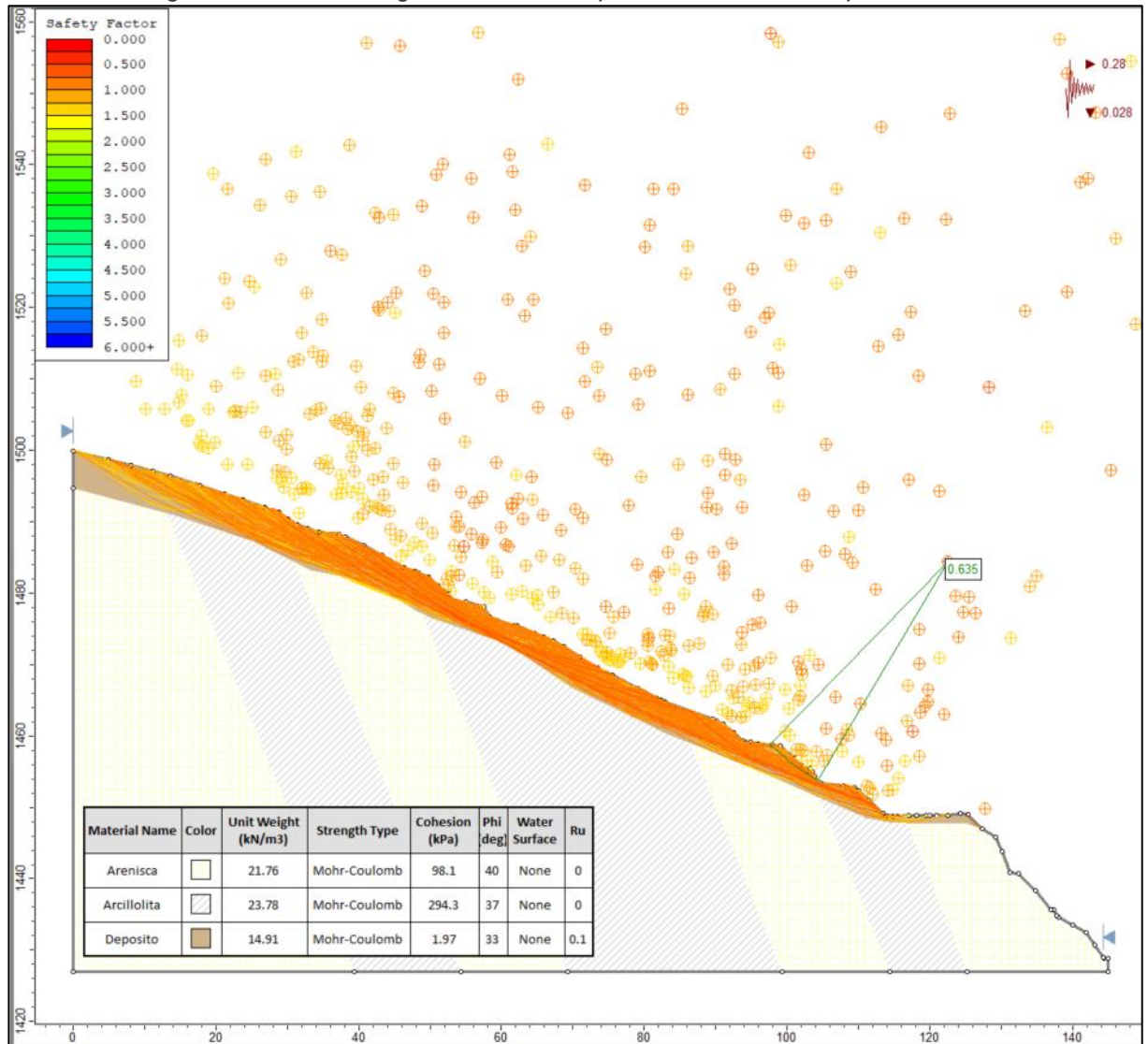
Fuente: Elaboración propia

Figura 54 Factor de seguridad condición estática actual perfil No.1



Fuente: Elaboración propia

Figura 55 Factor de seguridad condición pseudoestática actual perfil No.1.



Fuente: Elaboración propia




Tabla 19 Factores de seguridad condición actual.

ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD	
ESTATICO	LLUVIA	1.035
PSEUDOESTÁTICO	LLUVIA	0.635

Fuente: Elaboración propia

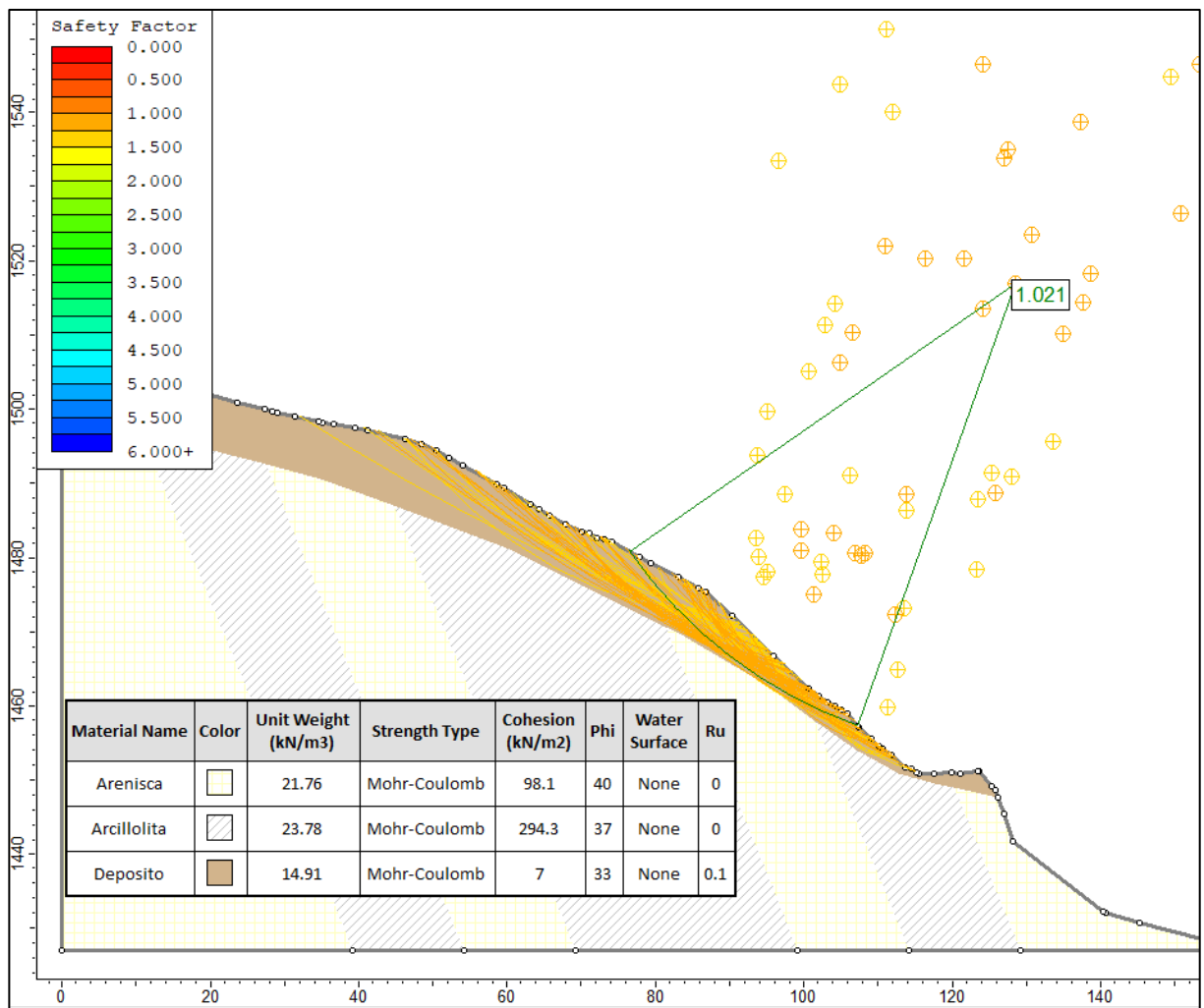
## 15.2 PERFIL DE ANÁLISIS NO.2

Tabla 20 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.2

Material	Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]	Modelo de resistencia	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Phi [°]	Nivel Freático [m]	Ru [-]	
	Deposito	14.91	Mohr-Coulomb	7	33	N/A	0.1
	Arenisca	21.76	Mohr-Coulomb	98.1	40	N/A	0.0
	Arcillolita	23.78	Mohr-Coulomb	294.3	37	N/A	0.0

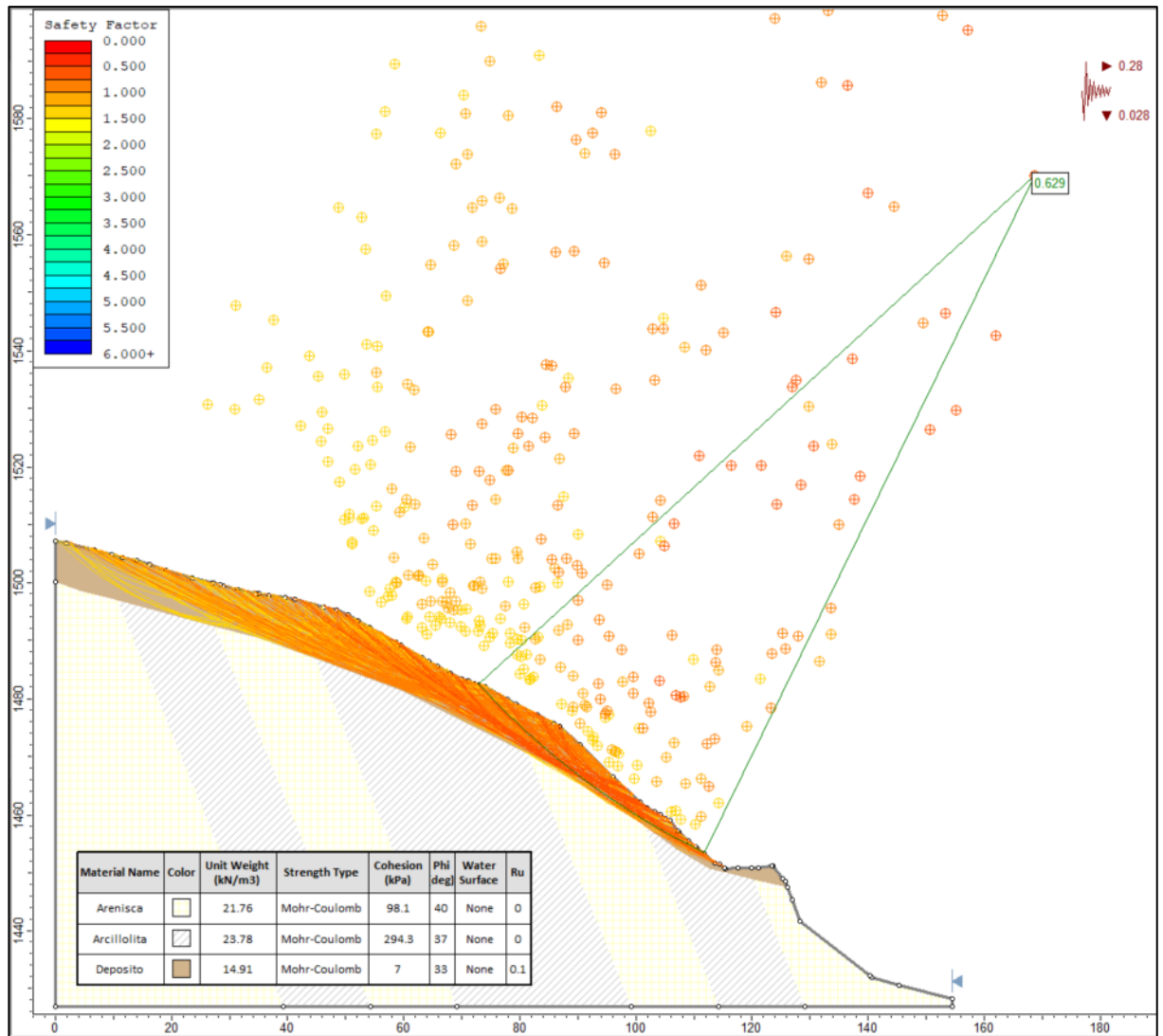
Fuente: Elaboración propia

Figura 56 Factor de seguridad condición estática actual perfil No.2



Fuente: Elaboración propia

Figura 57 Factor de seguridad condición pseudoestática actual perfil No.2



Fuente: Elaboración propia




Tabla 21 Factores de seguridad condición actual.

ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD	
ESTATICO	LLUVIA	1.021
PSEUDOESTÁTICO	LLUVIA	0.629

Fuente: Elaboración propia

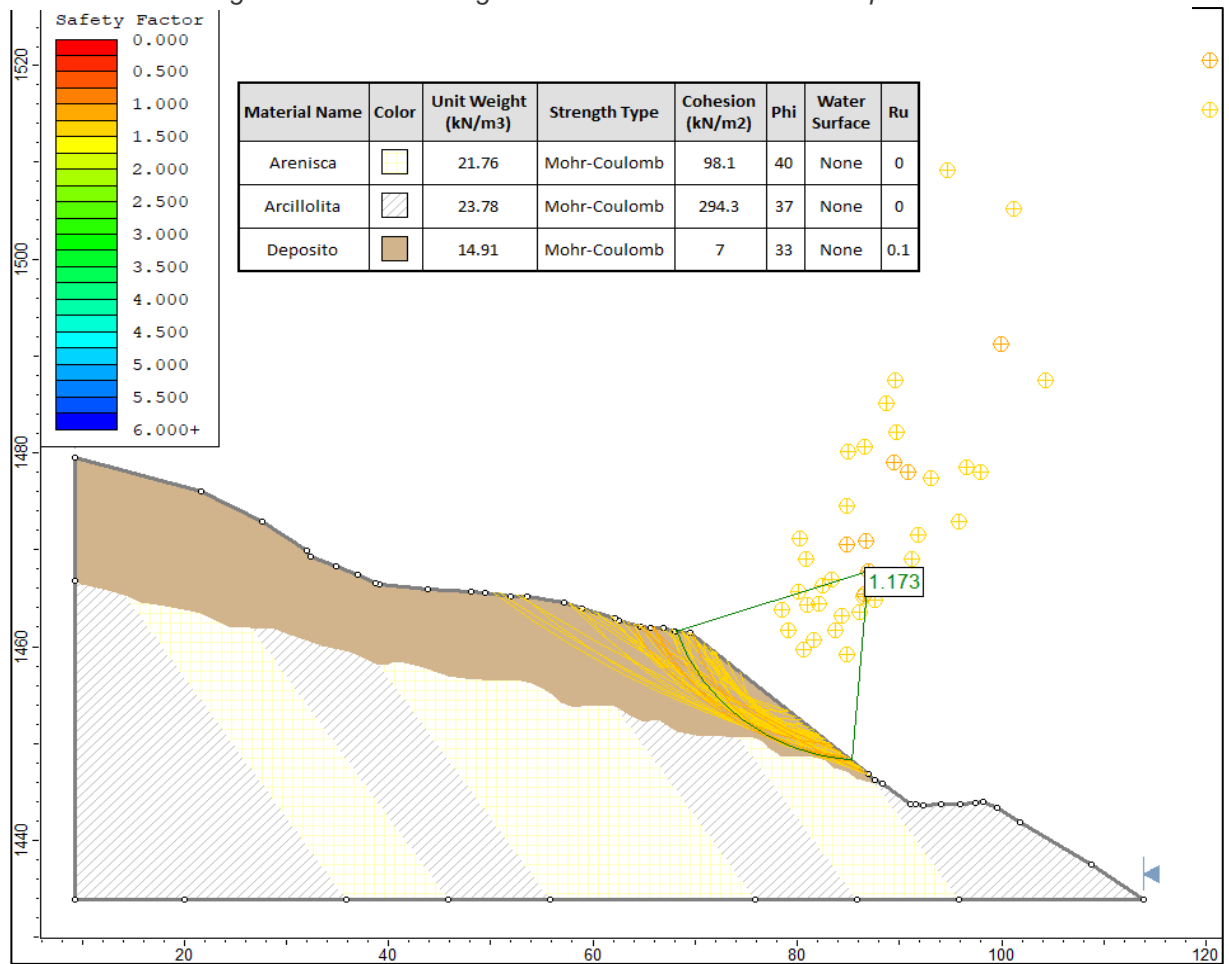
### 15.3 PERFIL DE ANÁLISIS NO.3

Tabla 22 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.3

	Material	Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]	Modelo de resistencia	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Phi [°]	Nivel Freático [m]	Ru [-]
	Deposito	14.91	Mohr-Coulomb	7	33	N/A	0.1
	Arenisca	21.76	Mohr-Coulomb	98.1	40	N/A	0.0
	Arcillolita	23.78	Mohr-Coulomb	294.3	37	N/A	0.0

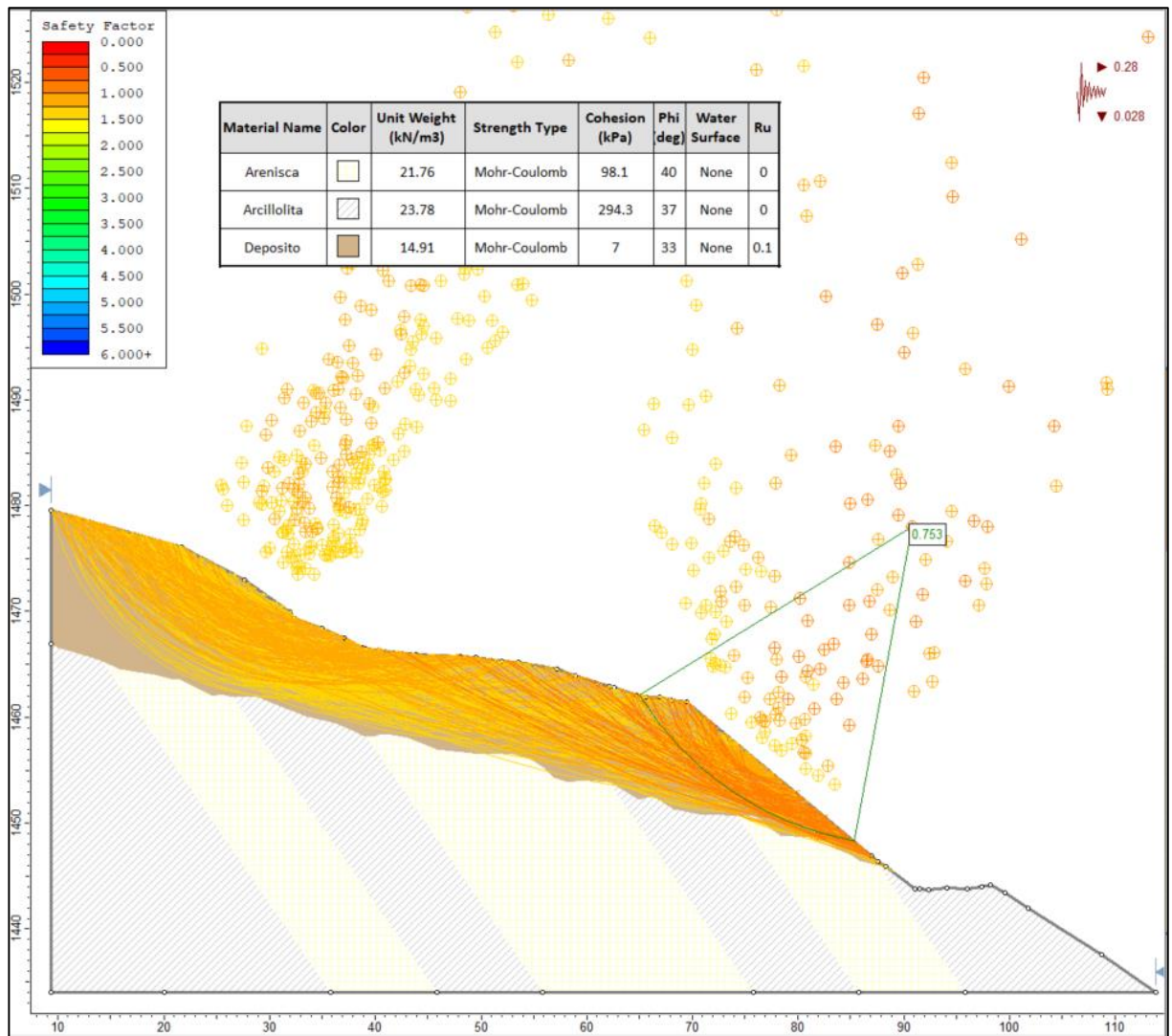
Fuente: Elaboración propia

Figura 58 Factor de seguridad condición estática actual perfil No.3



Fuente: Elaboración propia

Figura 59 Factor de seguridad condición pseudoestática actual perfil No.3



Fuente: Elaboración propia

Tabla 23 Factores de seguridad condición actual.

ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD	
ESTATICO	LLUVIA	1.173
PSEUDOESTÁTICO	LLUVIA	0.753

Fuente: Elaboración propia

## 16 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – PROPUESTA OBRAS DE MITIGACIÓN 2

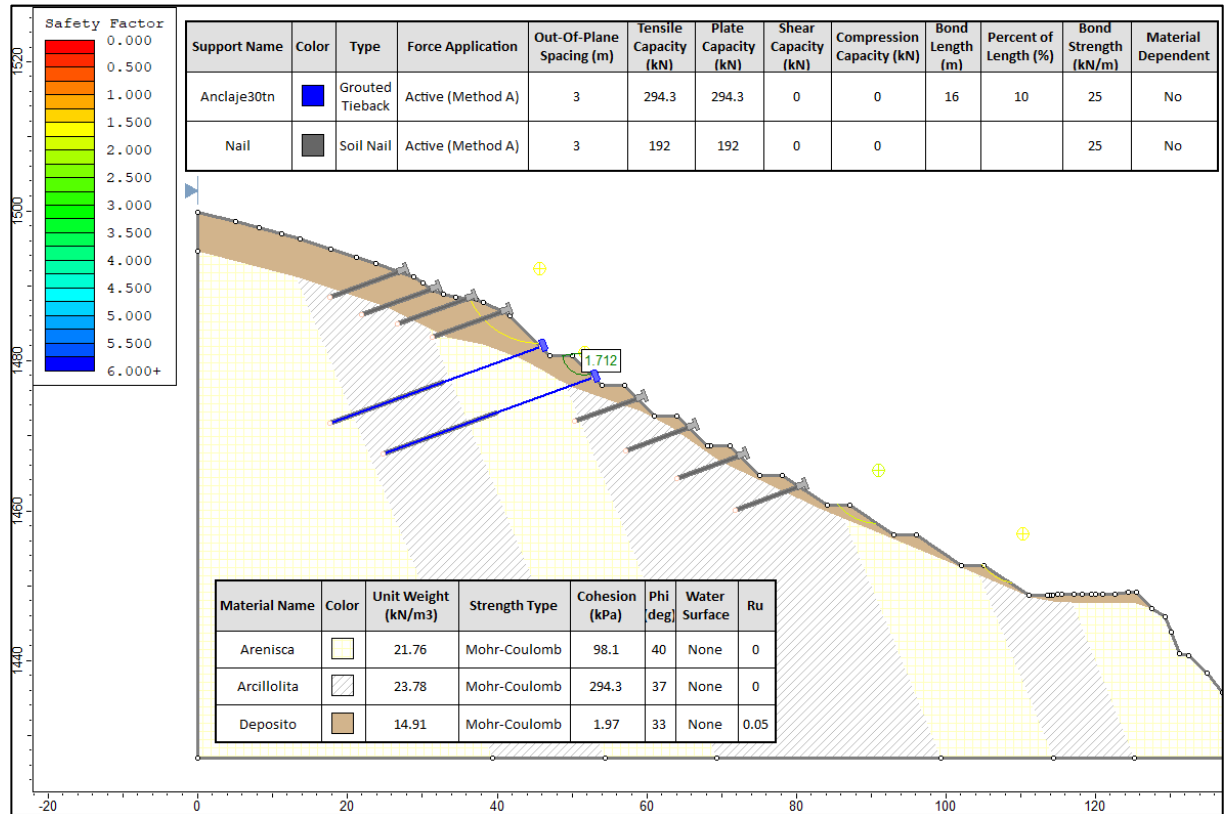
### 16.1 PERFIL DE ANÁLISIS NO.1

Tabla 24 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.1

	Material	Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]	Modelo de resistencia	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Phi [°]	Nivel Freático [m]	Ru [-]
	Deposito	14.91	Mohr-Coulomb	1.97	33	N/A	0.5
	Arenisca	21.76	Mohr-Coulomb	98.1	40	N/A	0.0
	Arcillolita	23.78	Mohr-Coulomb	294.3	37	N/A	0.0

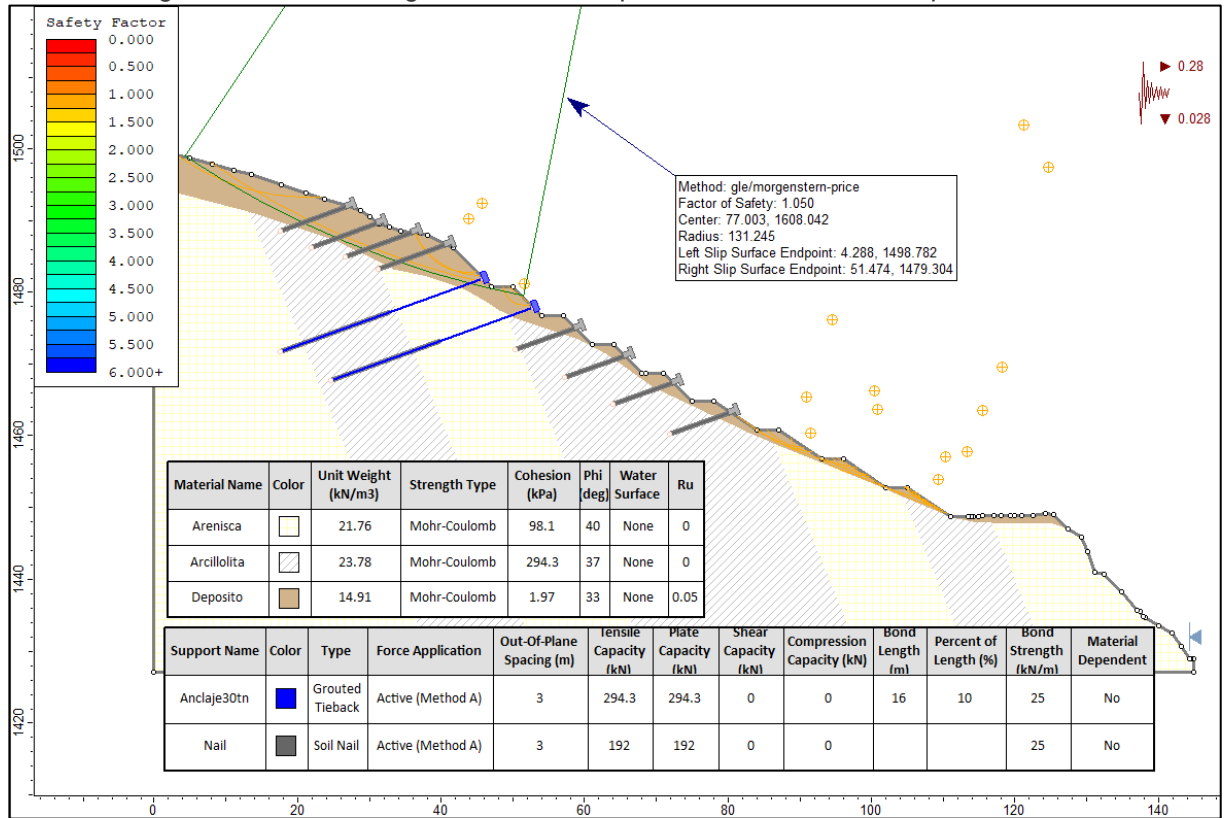
Fuente: Elaboración propia

Figura 60 Factor de seguridad condición estática con obras perfil No.1



Fuente: Elaboración propia

Figura 61 Factor de seguridad condición pseudoestática con obras perfil No.1



Fuente: Elaboración propia




Tabla 25 Factores de seguridad condición con obras.

ESCENARIO	FACTORES DE SEGURIDAD
ESTATICO	LLUVIA 1.712
PSEUDOESTÁTICO	LLUVIA 1.050

Fuente: Elaboración propia

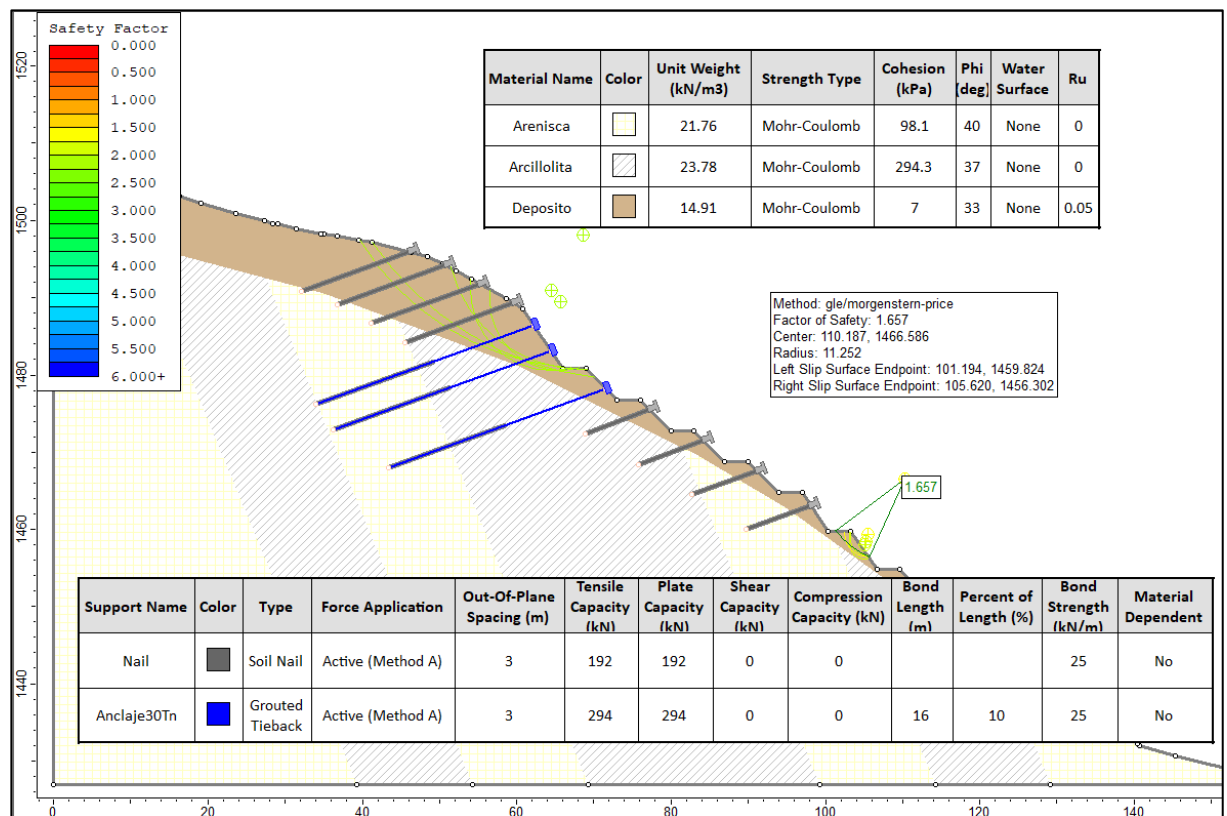
## 16.2 PERFIL DE ANÁLISIS NO.2

Tabla 26 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.2

Material	Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]	Modelo de resistencia	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Phi [°]	Nivel Freático [m]	Ru [-]	
	Deposito	14.91	Mohr-Coulomb	1.97	33	N/A	0.1
	Arenisca	21.76	Mohr-Coulomb	98.1	40	N/A	0.0
	Arcillolita	23.78	Mohr-Coulomb	294.3	37	N/A	0.0

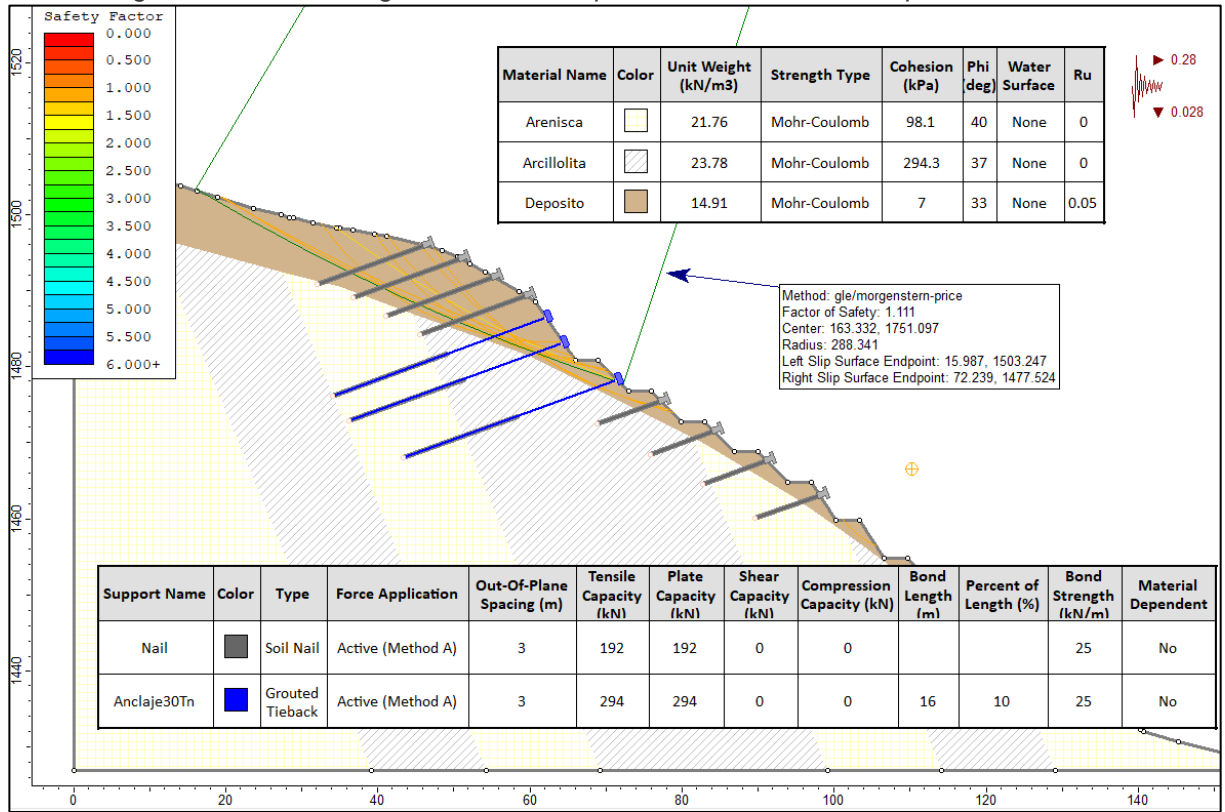
Fuente: Elaboración propia

Figura 62 Factor de seguridad condición estática con obras perfil No.2



Fuente: Elaboración propia

Figura 63 Factor de seguridad condición pseudoestática con obras perfil No.2



Fuente: Elaboración propia




Tabla 27 Factores de seguridad condición con obras.

ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD
ESTATICO	LLUVIA 1.657
PSEUDOESTÁTICO	LLUVIA 1.111

Fuente: Elaboración propia

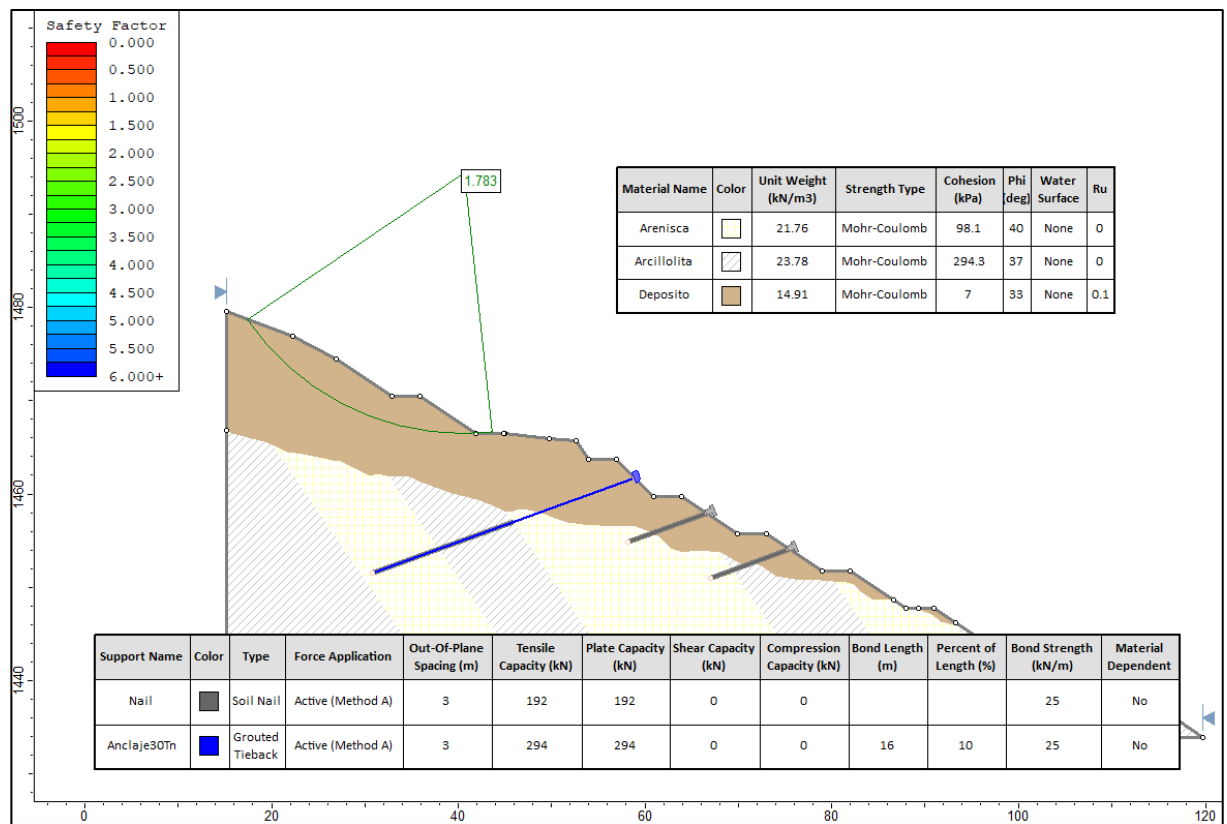
### 16.3 PERFIL DE ANÁLISIS NO.3

Tabla 28 Parámetros de resistencia adoptados para el perfil de análisis No.3

	Material	Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]	Modelo de resistencia	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Phi [°]	Nivel Freático [m]	Ru [-]
	Deposito	14.91	Mohr-Coulomb	1.97	33	N/A	0.1
	Arenisca	21.76	Mohr-Coulomb	98.1	40	N/A	0.0
	Arcillolita	23.78	Mohr-Coulomb	294.3	37	N/A	0.0

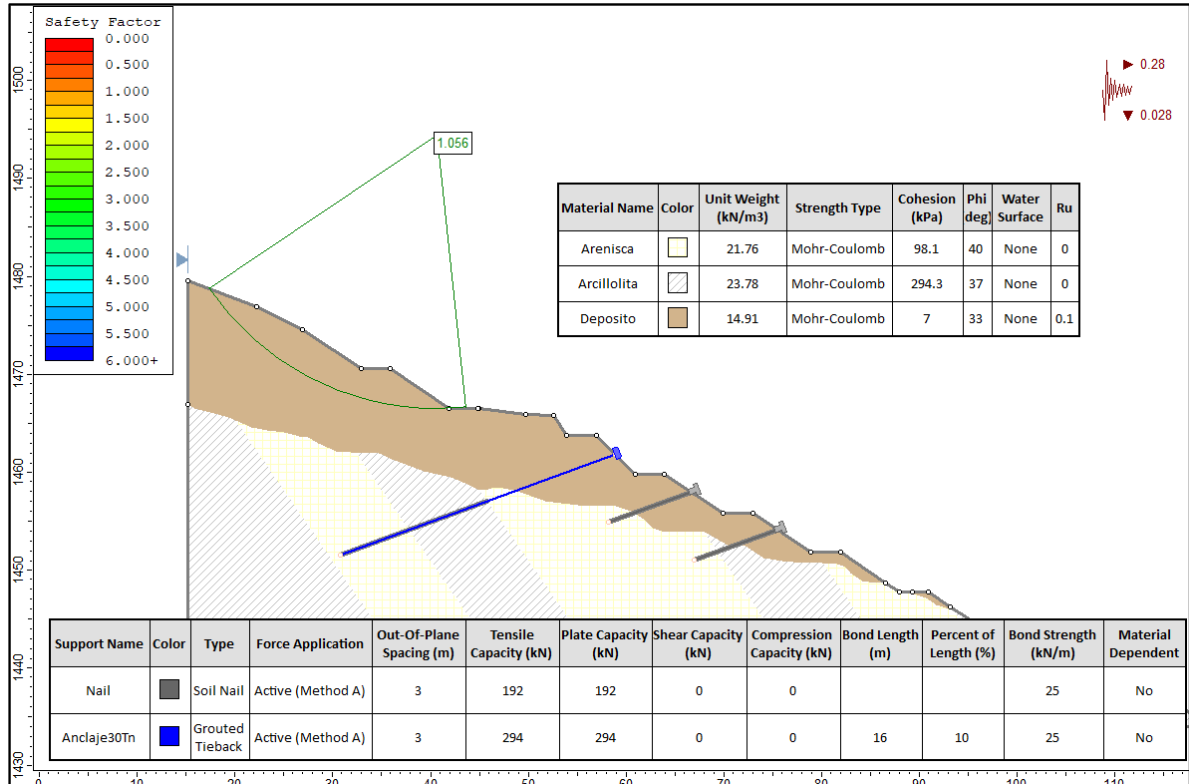
Fuente: Elaboración propia

Figura 64 Factor de seguridad condición estática con obras perfil No.3



Fuente: Elaboración propia

Figura 65 Factor de seguridad condición pseudoestática con obras perfil No.3



Fuente: Elaboración propia

Tabla 29 Factores de seguridad condición con obras

**ESCENARIO**

**FACTOR DE SEGURIDAD**

ESTATICO	LLUVIA	1.783
PSEUDOESTÁTICO	LLUVIA	1.056

Fuente: Elaboración propia

**17 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES**

A partir de los resultados obtenidos por medio de los estudios realizados a la zona objeto de intervención e implementados para su análisis en el software Slide, los perfiles del talud sin estabilizar no cumplen con las especificaciones requeridas y manifestadas en la norma NSR 10 evidenciando factores de seguridad menores a 1.5 para condiciones estáticas y 1.05 para condiciones pseudoestáticas.

Una vez incorporados los parámetros de prevención de riesgo a desplazamiento o movimientos en masa de tierra como anclajes, pernos, terraza, y cunetas se establece un incremento en los factores de seguridad que garantizan el cumplimiento de la norma en seguimiento de las especificaciones respectivas de diseño.

La relación anclajes-pernos cumple con las condiciones de factor de seguridad contemplando un valor superior a los indicados en la norma NSR-10 a partir de la optimización mecánica del talud mediante la programación analítica en el Software Slide. Además, los elementos cumplen con la capacidad de transmisión de fuerzas de tracción desde la superficie del terreno hasta la zona interior del talud. Agregándole a esto el cumplimiento de la normativa del suelo en cuanto a la tensión generada, en donde el talud no tiene afectaciones por socavación pues la influencia del cuerpo de agua cercano únicamente existe en el pie del talud ubicado en la zona inferior de la vía, la cual es ajena a la zona de estudio donde se presentan los movimientos de tierra o deslizamientos.

## **18 PRESUPUESTO Y PROGRAMACIÓN DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN**

La ejecución de la obra como propuesta de mitigación dispuesta para el perfil de análisis N°3, cuenta con un cálculo anticipado de coste y programación de actividades que refiere los siguientes apartados:

### 18.1 Memoria de cálculos de obra.

Las memorias de cálculos de costos referentes las unidades de producción de obra, se encuentran en el ANEXO G.

### 18.2 Presupuesto de obra de mitigación

Tabla 30 Presupuesto De Obra de Mitigación

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. PARCIAL
1. . . . .	PRELIMINARES				
1. 1. . . . .	ROCERIA Y LIMPIEZA	M2	12,987.80	1,512.00	19,637,553.60
1. 2. . . . .	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO TERR.	HA	1.30	5,259,338.00	6,837,139.40
1. 3. . . . .	LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO	M2	12,987.80	3,360.00	43,639,008.00
			<b>TOTAL CAPITULO 1</b>		<b>70,113,701.00</b>
2. . . . .	EXCAVACIONES				
2. 1. . . . .	EXCAVACION	M3	41,223.20	23,973.00	988,243,773.60
2. 2. . . . .	EXCAVACIÓN MANÚAL SIN CLASIFICAR CUNETAS	M3	344.50	66,406.00	22,876,867.00
			<b>TOTAL CAPITULO 2</b>		<b>1,011,120,640.60</b>
3. . . . .	CONCRETOS				
3. 1. . . . .	CONCRETO 17.5 MPA SOLADO CUNETAS	M3	99.60	636,317.00	63,377,173.20
3. 2. . . . .	CONCRETO 28.0 MPA PARA DADO 2.5X2.5X0.3	M3	264.40	963,315.00	254,700,486.00
3. 3. . . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA CUNETAS	M3	117.50	869,628.00	102,181,290.00
3. 4. . . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA BERMA	M3	215.30	869,628.00	187,230,908.40
			<b>TOTAL CAPITULO 3</b>		<b>607,489,857.60</b>
4. . . . .	ANCLAJES				
4. 1. . . . .	ANCLAJES DE 30 TON	ML	4,230.00	568,338.00	2,404,069,740.00
4. 2. . . . .	ANCLAJE PASIVO	ML	1,989.00	338,608.00	673,491,312.00
4. 3. . . . .	CAPERUZA DE PROTECCION METALICA PARA EL	UND	141.00	94,004.00	13,254,564.00
4. 4. . . . .	ACERO DE REFUERZO D=1/2 PARA DADO EN	KG	15,946.80	10,364.00	165,272,635.20
			<b>TOTAL CAPITULO 4</b>		<b>3,256,088,251.20</b>
5. . . . .	TALUD				
5. 1. . . . .	TALUD REVEGETALIZADO	M2	10,186.20	60,546.00	616,733,665.20
			<b>TOTAL CAPITULO 5</b>		<b>616,733,665.20</b>
6. . . . .	DRENES				
6. 1. . . . .	SUB DRENTUBERIA =2	ML	1,722.00	328,428.00	565,553,016.00
			<b>TOTAL CAPITULO 6</b>		<b>565,553,016.00</b>

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. PARCIAL
					<b>TOTAL DIRECTOS</b>
					<b>6,127,099,132.00</b>
	<b>COSTOS INDIRECTOS:</b>				
	<b>ADMINISTRACIÓN</b>			20.00	1,225,419,826.0
	<b>IMPREVISTOS</b>			3.00	0
	<b>UTILIDAD</b>			7.00	183,812,974.00
					<b>428,896,939.00</b>
	<b>IVA</b>				
					<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS:</b>
					<b>1,838,129,739.00</b>
	<b>VALOR PROPUESTA</b>				<b>7,965,228,871.00</b>

*Fuente: Elaboración propia*

### 18.3 Diagrama de Grant Programación

Tabla 31 Diagrama de Grant Programación

Diagrama de Barras

CODIGO	DESCRIPCION	DURACIÓN	DESDE: 01/03/2023	-
1. . . . .	PRELIMINARES	34		
1.1. . . .	ROCERIA Y LIMPIEZA	22		
1.2. . . .	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO TERR. QUEBRADO	13		
1.3. . . .	LOCALIZACION Y REPLANTEO	11		
2. . . . .	EXCAVACIONES	41		
2.1. . . .	EXCAVACION RETROEXCAVADORA-CONGLOMERADO	41		
2.2. . . .	EXCAVACION MANUAL SIN CLASIFICAR CUNETAS	32		
3. . . . .	CONCRETOS	117		
3.1. . . .	CONCRETO 17.5 MPA SOLADO CUNETA	100		
3.2. . . .	CONCRETO 28.0 MPA PARA DADO 2.5X2.5X0.3	103		
3.3. . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA CUNETA	31		
3.4. . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA BERMA	50		
4. . . . .	ANCLAJES	106		
4.1. . . .	ANCLAJES DE 30 TON	106		
4.2. . . .	ANCLAJE PASIVO	50		
4.3. . . .	CAPERUZA DE PROTECCION METALICA PARA EL	12		
4.4. . . .	ACERO DE RÉFUERZO D=1/2 PARA DADO EN	40		
5. . . . .	TALUD	32		
5.1. . . .	TALUD REVEGETALIZADO	32		
6. . . . .	DRENES	43		
6.1. . . .	SUB DRENTUBERIA =2	43		

Fuente: Elaboración propia

## 18.4 Flujo De Fondos

Tabla 32 Flujo De Fondos

ITEM	DESITEM	VALOR	FECINITEMP	FECTERTEMP	DURITEM	MES1	MES2
1. . . .	PRELIMINARES		01/03/2023	03/04/2023	34.00		
1. 1. . .	ROCERIA Y LIMPIEZA	19,637,553.60	01/03/2023	22/03/2023	22.00	19,637,553.60	
		100.00 %				100.00 %	
1. 2. . .	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO TERR. QUEBRADO	6,837,139.40	22/03/2023	03/04/2023	13.00	4,733,404.20	2,103,735.20
		100.00 %				69.23 %	30.77 %
1. 3. . .	LOCALIZACION Y REPLANTEO	43,639,008.00	22/03/2023	01/04/2023	11.00	35,704,642.91	7,934,365.09
		100.00 %				81.82 %	18.18 %
2. . . .	EXCAVACIONES		03/04/2023	13/05/2023	41.00		
2. 1. . .	EXCAVACION RETROEXCAVADORA-CONGLOMERADO INCLUYE TRANSPORTE	988,243,773.60	03/04/2023	13/05/2023	41.00		650,794,680.18
		100.00 %					65.85 %
2. 2. . .	EXCAVACION MANUAL SIN CLASIFICAR CUNETAS	22,876,867.00	10/04/2023	11/05/2023	32.00		14,298,041.88
		100.00 %					62.50 %
3. . . .	CONCRETOS		13/05/2023	06/09/2023	117.00		
3. 1. . .	CONCRETO 17.5 MPA SOLADO CUNETAS	63,377,173.20	30/05/2023	06/09/2023	100.00		
		100.00 %					
3. 2. . .	CONCRETO 28.0 MPA PARA DADO 2.5X2.5X0.3	254,700,486.00	13/05/2023	23/08/2023	103.00		
		100.00 %					
3. 3. . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA CUNETAS	102,181,290.00	30/05/2023	29/06/2023	31.00		
		100.00 %					
3. 4. . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA BERMA	187,230,908.40	30/05/2023	18/07/2023	50.00		
		100.00 %					

4. . . .	ANCLAJES		13/05/2023	26/08/2023	106.00		
4. 1. . .	ANCLAJES DE 30 TON	2,404,069,740.	13/05/2023	26/08/2023	106.00		38
		100.00 %					16
4. 2. . .	ANCLAJE PASIVO	673,491,312.00	13/05/2023	01/07/2023	50.00		22
		100.00 %					34
4. 3. . .	CAPERUZA DE PROTECCION METALICA PARA EL CABEZAL DE ANCLAJE D=160 MM	13,254,564.00	13/05/2023	24/05/2023	12.00		13
		100.00 %					10
4. 4. . .	ACERO DE REFUERZO D=1/2 PARA DADO EN CONCRETO	165,272,635.20	13/05/2023	21/06/2023	40.00		70
		100.00 %					42
5. . . .	TALUD		23/08/2023	23/09/2023	32.00		
5. 1. . .	TALUD REVEGETALIZADO	616,733,665.20	23/08/2023	23/09/2023	32.00		
		100.00 %					
6. . . .	DRENES		13/05/2023	24/06/2023	43.00		
6. 1. . .	SUB DRENTUBERIA =2	565,553,016.00	13/05/2023	24/06/2023	43.00		22
		100.00 %					39

Fuente: Elaboración propia

## 18.5 Cuadro de Actividades de Precedencia y Tiempos

Tabla 33 Actividades de Precedencia y Tiempos

ITEM	DESCRIPCION DEL ITEM	DURACION (Dias)	INICIACIONES		TERMINACIONES		HOLGURA	TIPO ACTIVIDAD	PRECED
			TEMPRANA	TARDIA	TEMPRANA	TARDIA			
1. . . . .	PRELIMINARES								
1. 1. . . .	ROCERIA Y LIMPIEZA	22	1	1	22	22	769	NORMAL	
1. 2. . . .	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO TERR. QUEBRADO	13	22	22	13	13	769	NORMAL	1. 1. . . .
1. 3. . . .	LOCALIZACION Y REPLANTEO	11	22	22	11	11	815	NORMAL	
2. . . . .	EXCAVACIONES								
2. 1. . . .	EXCAVACION RETROEXCAVADORA-CONGLOMERADO INCLUYE TRANSPORTE	41	34	34	41	41	620	NORMAL	
2. 2. . . .	EXCAVACION MANUAL SIN CLASIFICAR CUNETAS	32	41	41	32	32	568	NORMAL	
3. . . . .	CONCRETOS								
3. 1. . . .	CONCRETO 17.5 MPA SOLADO CUNETAS	100	91	91	100	100	726	NORMAL	
3. 2. . . .	CONCRETO 28.0 MPA PARA DADO 2.5X2.5X0.3	103	74	74	103	103	0	CRITICA	
3. 3. . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA CUNETAS	31	91	91	31	31	606	NORMAL	
3. 4. . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA BERMA	50	91	91	50	50	422	NORMAL	
4. . . . .	ANCLAJES								
4. 1. . . .	ANCLAJES DE 30 TON	106	74	74	106	106	720	NORMAL	
4. 2. . . .	ANCLAJE PASIVO	50	74	74	50	50	776	NORMAL	
4. 3. . . .	CAPERUZA DE PROTECCION METALICA PARA EL CABEZAL DE ANCLAJE D=160 MM	12	74	74	12	12	814	NORMAL	
4. 4. . . .	ACERO DE REFUERZO D=1/2 PARA DADO EN CONCRETO	40	74	74	40	40	786	NORMAL	
5. . . . .	TALUD								
5. 1. . . .	TALUD REVEGETALIZADO	32	176	176	32	32	444	NORMAL	
6. . . . .	DRENES								
6. 1. . . .	SUB DRENTUBERIA =2	43	74	74	43	43	783	NORMAL	

Fuente: Elaboración propia

## 18.6 Resumen De La Programación

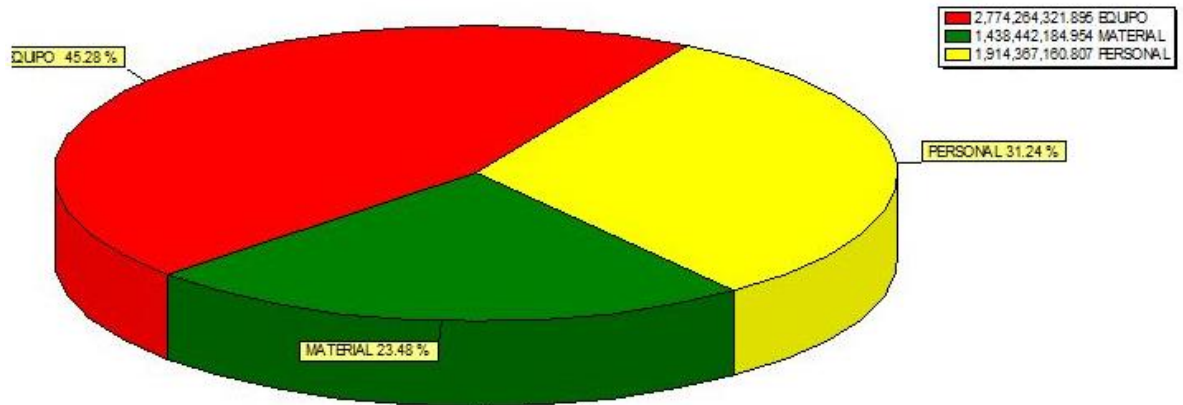
Tabla 34 Resumen De La Programación

ITEM	DESCRIPCION DEL ITEM	DURACION (días)	INICIACION		TERMINACION	
			DIA	FECHA	DIA	FECHA
1. . . . .	PRELIMINARES	34	1	01/03/2023	34	03/04/202
1. 1. . . . .	ROCERIA Y LIMPIEZA	22	1	01/03/2023	22	22/03/202
1. 2. . . . .	LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO TERR.	13	22	22/03/2023	34	03/04/202
1. 3. . . . .	LOCALIZACION Y REPLANTEO	11	22	22/03/2023	32	01/04/202
2. . . . .	EXCAVACIONES	41	34	03/04/2023	74	13/05/202
2. 1. . . . .	EXCAVACION	41	34	03/04/2023	74	13/05/202
2. 2. . . . .	EXCAVACION MANUAL SIN CLASIFICAR	32	41	10/04/2023	72	11/05/202
3. . . . .	CONCRETOS	117	74	13/05/2023	190	06/09/202
3. 1. . . . .	CONCRETO 17.5 MPA SOLADO CUNETAS	100	91	30/05/2023	190	06/09/202
3. 2. . . . .	CONCRETO 28.0 MPA PARA DADO 2.5X2.5X0.3	103	74	13/05/2023	176	23/08/202
3. 3. . . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA CUNETAS	31	91	30/05/2023	121	29/06/202
3. 4. . . . .	CONCRETO 21.0 MPA PARA BERMA	50	91	30/05/2023	140	18/07/202
4. . . . .	ANCLAJES	106	74	13/05/2023	179	26/08/202
4. 1. . . . .	ANCLAJES DE 30 TON	106	74	13/05/2023	179	26/08/202
4. 2. . . . .	ANCLAJE PASIVO	50	74	13/05/2023	123	01/07/202
4. 3. . . . .	CAPERUZA DE PROTECCION METALICA PARA	12	74	13/05/2023	85	24/05/202
4. 4. . . . .	ACERO DE REFUERZO D=1/2 PARA DADO EN	40	74	13/05/2023	113	21/06/202
5. . . . .	TALUD	32	176	23/08/2023	207	23/09/202
5. 1. . . . .	TALUD REVEGETALIZADO	32	176	23/08/2023	207	23/09/202
6. . . . .	DRENES	43	74	13/05/2023	116	24/06/202
6. 1. . . . .	SUB DRENTUBERIA =2	43	74	13/05/2023	116	24/06/202

Fuente: Elaboración propia

## 18.7 Cantidad de Insumos

Figura 66 Cantidad De Insumos



Fuente: Elaboración propia.

## 19 CONCLUSIONES

Para el análisis de estabilidad del talud localizado en la vía que comunica los municipios de Toledo y Labateca se tuvieron en cuenta los factores condicionantes como la geología, geomorfología, aspectos geotécnicos, topografía, hidrología, hidrogeología, condiciones climáticas, así como la acción de la sismicidad y el factor antrópico.

El mecanismo de falla más importante en los taludes estudiados corresponde a un deslizamiento traslacional, en el cual se forman cuñas de fractura sobre el material de suelo depositado sobre la roca madre, que alterna entre arcilla y arenisca. El principal detonante de los movimientos de remoción de masa que se presentan en el sitio corresponde a la saturación de la capa superior del suelo durante los sucesivos eventos de lluvia de alta intensidad.

Los taludes en las condiciones actuales parecen ser estables en las condiciones secas de los materiales involucrados, pero la estabilidad es sensible a la presencia de agua, utilizando el coeficiente  $R_u$  para analizar la presencia de agua específicamente para los sedimentos superficiales presentes en todo el talud.

Las medidas de estabilización propuestas incluyen terrazas con una altura máxima de 4,0 a 5,0 metros dependiendo de la pendiente prevista, interrumpidas por bermas de 3,0 metros de ancho. Además, los anclajes activos de 30 toneladas de peso, espaciados a 3,0 metros, tienen una longitud total de 30 metros, una longitud de bulbo de 16 metros, un diámetro de bulbo de 10 cm y un ángulo de inclinación de  $20^\circ$  con respecto al horizontal y pasivo. anclas La longitud total recomendada es de 9,0 metros, con un diámetro de 10 cm y una inclinación de  $20^\circ$  respecto a la horizontal.

Estas medidas de estabilización deberán complementarse con la ejecución de obras de mejoramiento, que contribuyan al adecuado tratamiento de las aguas superficiales y subterráneas. Se propone instalar un sistema de drenaje subterráneo de filtraciones en una tubería de PVC calibre 0.80 de 3 pulgadas, 20 m de largo y 5% de pendiente, como un sistema de recolección de aguas subterráneas que se proveerá a una zanja ubicada en el perfil propuesto. De acuerdo a los resultados obtenidos, la implementación de la estructura de contención es suficiente para garantizar la estabilidad del punto crítico, de acuerdo al factor de seguridad exigido por la norma NSR-10.

Si durante la construcción de las obras previstas se encontraren características diferentes a las aquí descritas, se deberá informar al ingeniero geotécnico para que realice las correcciones necesarias.

Se realizó la correspondiente estructuración del presupuesto obteniendo una estimación del costo total de la propuesta de estabilización de Talud (Puerto rico) de la vía que comunica los municipios de Toledo y Labateca del departamento Norte Santander de \$7.965.228.871 moneda corriente (COP). A su vez se manifiesta el planteamiento del cronograma y programa de las actividades propuestas en la obra que costa de aproximadamente 10 meses de duración para su ejecución.

## 20 BIBLIOGRAFÍA

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David y MAYS, Larry. Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá: Mc Graw Hill, 1994. p. 299.

CONSEJO MUNICIPAL DE TOLEDO. Esquema de Ordenamiento Territorial municipio de Toledo. Toledo, Norte de Santander, 2001. p. 147.

CONSEJO MUNICIPAL DE TOLEDO. Plan de Desarrollo “Otro Toledo es Posible” 2012-2015. Toledo, Norte de Santander, 2012. p. 63.

CONSEJO MUNICIPAL DE TOLEDO. Plan de Desarrollo Territorial municipio de Toledo “Unidos para avanzar” 2016-2019. Toledo, Norte de Santander, 2016. p. 267.

EUSCÁTEGUI, Christian y HURTADO, Gonzalo. Análisis del impacto el fenómeno “la niña” 2010- 2011 en la hidroclimatología del país. [En línea]. Documentos IDEAM. Bogotá D.C, 2011. (Recuperado en 29 mayo 2017). Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/An%C3%A1lisis+Impacto+La+Ni%C3%B1a.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>.

GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT THE GOVERNMENT OF THE HONG KONG SPECIAL ADMINISTRATIVE REGION. Highway slope manual. 1 Ed. Hong Kong: Publications Sales Section, 2000. p. 582.

GERSCOVICH, Denise M.S. Estabilidad de taludes. Bogotá: Lemoine Editores. 2015. p. 200.

INGEOMINAS. Geología y Geoquímica de la plancha 111 Toledo-Norte de Santander escala 1:100000. Bogotá D.C, 2001. p. 56.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10-Titulo H- Estudios Geotécnicos. Bogotá D.C, 2010. p. 72.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000. Bogotá D.C, 2017. p. 214.

SUAREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. 1 Ed. Bucaramanga: Publicaciones UIS, 1998. p. 112.

SUAREZ DÍAZ, Jaime. Diseño de muros de suelo reforzados con geosintéticos. 1 Ed. Bucaramanga: Publicaciones UIS, 2004. p.112.

SUAREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamientos. Volumen I: Análisis Geotécnico. Bucaramanga: Publicaciones UIS, 2009. p. 1030.