

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA – GEOTÉCNICA DE LOS TALUDES A  
LO LARGO DEL CANAL DE CONDUCCIÓN DEL PROYECTO  
HIDROELÉCTRICO PALMIRA Y SU EVALUACIÓN Y MEDIDAS DE  
MITIGACIÓN**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
GEÓLOGA**

**OPCIÓN: ESTUDIO TÉCNICO**

**JOSELYN ROXANA ROJAS RONQUILLO**

**joselyn3r@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. DIEGO RENATO CÁRDENAS CÁRDENAS M.S.c**

**diego.cardenas@epn.edu.ec**

**CODIRECTOR: ING. PEDRO SANTIAGO REYES BENÍTEZ PhD**

**pedro.reyes@epn.edu.ec**

**Quito, noviembre 2018.**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Joselyn Roxana Rojas Ronquillo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Joselyn Roxana Rojas Ronquillo

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo fue desarrollado por la Srta. Joselyn Roxana Rojas Ronquillo, bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. Diego Cárdenas MSc.**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**Ing. Pedro Reyes PhD.**  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## DEDICATORIA

*A mi querida madre, por ser incondicional, darme su apoyo y amor, por enseñarme a ser una mujer luchadora y fuerte.*

*A mi padre, por sus consejos, que hicieron de mí una mujer segura y valiente.*

*A mis hermanas, porque a pesar de todo, sin ellas mi vida sería aburrida.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a María Santísima por haberme dado sabiduría, fuerza y salud para terminar mi carrera.

A mi madre, a mi padre y a mis hermanas por toda la confianza y el apoyo, porque en todos los momentos en que me sentí vencida estuvieron a mi lado para reconfortarme, ellos fueron mi fortaleza, ellos son mi inspiración y sin ellos esto no sería posible.

A la Escuela Politécnica Nacional por ser mi alma máter, por haberme recibido y permitirme ser parte de la mejor universidad del país.

Por su puesto, a todos los profesores que son parte de la Facultad de Geología y Petróleos: Arturo Egüez, Bernardo Beate, Halina Lachowicz, Pablo Duque, Hugo Yepes, Renán Cornejo, Jorge Sevilla, Galo Plaza, Silvana Hidalgo, Daniel Andrade, quienes son un ícono de la facultad, gracias por la paciencia y dedicación, fue un honor estar en sus clases.

De manera especial quiero agradecer al Ingeniero Pedro Reyes, porque además de ser profesor es un gran amigo; al Ingeniero Diego Cárdenas, mi director de Tesis, quien ha sabido contagiarme su entusiasmo por la Geología Aplicada, por guiarme durante todo este proceso y por ser un amigo.

A Ricardo Cartagena, gracias por todo tu amor, apoyo y dedicación, tú sabes lo importante que eres para mí.

A mis amigos, mi querida Manada: Hugo Carrasco (Bebé), Paul Buenaño (Chivito), Marcelo Cajas (Chelo), Asdrúbal Arteaga (Asdruberch), Daniel Salguero (Juan Ma), Andrés Zambrano (Draga), Luis Navarrete (Lenon), Jean Andrade (Jpa) y Paul Jiménez (Panchichis), gracias muchachos por su amistad y por todos los momentos compartidos.

A Alberto Mera, Milton Gonzaga y Diego Vinueza, gracias por su apoyo y amistad.

Al laboratorio Lemsur, de la Escuela Politécnica Nacional, de manera especial para la Ingeniera Mercedes Villacís y al Ingeniero Iván Lituma, quienes siempre estuvieron prestos a brindarme su ayuda y compartir sus conocimientos.

A Hidroequinoccio EP, por brindarme la oportunidad para demostrar mis conocimientos y aprender mucho más; al Ingeniero Giovanni Taco por su apoyo, compartir sus conocimientos y por brindarme su amistad.

# TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	1
CERTIFICACIÓN.....	2
DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
TABLA DE CONTENIDO .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
RESUMEN.....	13
ABSTRACT .....	14
CAPÍTULO I.....	15
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Justificación.....	16
1.1.1 Justificación Teórica.....	16
1.1.2 Justificación Metodológica .....	16
1.1.3 Justificación Práctica.....	17
1.2 Objetivos .....	17
1.2.1 Objetivo General.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Descripción de la zona de estudio.....	17
1.3.1 Ubicación .....	17
1.3.2 Aspecto Físico.....	18
1.3.3 Geología Local.....	19
1.3.4 Litoestratigrafía .....	20
1.3.5 Geología del Cuaternario del área de estudio. ....	25
1.3.6 Inestabilidad en taludes.....	29
CAPITULO II .....	31
2 MARCO CONCEPTUAL.....	31
2.1 Conceptos Generales .....	31
2.2 Talud o ladera .....	32
2.3 Clasificación de movimientos .....	32
2.4 Mecánica de suelos.....	32

2.5	Resistencia al Corte .....	33
2.6	Cohesión y ángulo de fricción interna .....	36
2.7	Factor de seguridad .....	36
CAPÍTULO III .....		37
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	37
3.1	Organización del estudio .....	37
3.2	Métodos de equilibrio límite .....	38
3.3	Análisis de estabilidad .....	39
3.4	Levantamiento del inventario de FRM.....	40
3.5	Descripción Litoestratigráfica.....	42
3.6	Características Geotécnicas.....	43
3.7	Investigación de laboratorio .....	44
3.7.1	Ensayo de Corte Directo .....	44
3.7.2	Ensayos para la Clasificación de Suelo tipo S.U.C.S.....	46
3.8	Modelación matemática utilizando software.....	49
3.8.1	Método de Bishop Simplificado .....	49
3.8.2	Método de Spencer .....	51
3.8.3	Método de Janbú.....	52
3.9	Geoestadística .....	53
3.10	Uso del software SLIDE 5.014 en el análisis de estabilidad de taludes.....	55
CAPÍTULO IV .....		57
4	RESULTADOS.....	57
4.1	Inventario de los fenómenos de remoción en masa .....	57
4.2	Características Geotécnicas.....	59
4.2.1	Ensayos para Clasificación S.U.C.S. ....	59
4.2.2	Ensayos Límites de Atterberg.....	60
4.2.3	Ensayos de Corte Directo .....	62
4.3	Unidades Geotécnicas.....	65
4.3.1	Unidad SM .....	65
4.3.2	Unidad ML.....	65
4.3.3	Unidad MH.....	65
4.4	Causas de los movimientos de FRM.....	66
4.4.1	Factores Preparatorios .....	66
4.4.2	Factores Detonantes.....	67
4.5	Análisis de susceptibilidad a FRM .....	68

4.5.1	Ponderación de la variable pendiente.....	68
4.5.2	Ponderación de la variable litología.....	69
4.5.3	Ponderación de la variable humedad del terreno.....	70
4.5.4	Ponderación de la variable propiedades geomecánicas.....	71
4.6	Drenaje.....	72
4.7	Geosintéticos.....	73
4.8	Análisis de estabilidad de los taludes estudiados .....	76
4.8.1	Deslizamiento en 0+150 (D-011) .....	76
4.8.2	Deslizamiento en 0+340 (D-016) .....	77
4.8.3	Deslizamiento en 0+535 (DD-001) .....	79
4.8.4	Deslizamiento en 0+630 (DD-004) .....	81
4.8.5	Deslizamiento en 0+730 (DD-002) .....	83
4.8.6	Deslizamiento en 1+126 (D-001) .....	84
4.8.7	Deslizamiento en 1+180 (D-002) .....	86
4.8.8	Deslizamiento en 1+430 (D-003) .....	88
4.8.9	Deslizamiento en 1+510 (D-004) .....	90
4.8.10	Deslizamiento en 1+680 (D-005) .....	92
4.8.11	Deslizamiento en 1+710 (D-012) .....	94
4.8.12	Deslizamiento en 1+896 (D-014) .....	96
4.8.13	Deslizamiento en 1+950 (D-015) .....	98
4.8.14	Deslizamiento en 2+090 (DD-003) .....	100
4.8.15	Deslizamiento en 2+170 (D-013) .....	102
4.8.16	Deslizamiento en 2+460 (D-006) .....	104
4.8.17	Deslizamiento en 2+610 (D-007) .....	105
4.8.18	Deslizamiento en 2+960 (D-008) .....	107
4.8.19	Deslizamiento en 3+290 (D-009) .....	109
4.8.20	Deslizamiento en curva acceso a CM (D-010) .....	110
4.9	Factores de seguridad .....	111
CAPITULO V.....		114
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114
5.1	Conclusiones.....	114
5.2	Recomendaciones.....	115
BIBLIOGRAFÍA.....		116
6	ANEXOS.....	118
6.1	Anexo I. Ensayos Geomecánicos.....	118



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación del área de estudio .....	18
Figura 1.2 Mapa que resalta la trayectoria del río Alambi y las diferentes alturas del lugar.....	20
Figura 1.3 Estereograma con las 102 medidas estructurales, generando los planos y polos de las cuatro principales familias de diaclasas (Figura A). Concentración de polos y criterios para determinar las tres familias de diaclasas (Figura B). Medidas tomadas a la entrada del campamento de la hidroeléctrica (UTM, WGS 84: 758419E; 17473N). .....	24
Figura 2.1 Ilustraciones que diferencian un talud (izquierda) de una ladera (derecha), junto con las partes de cada uno. Tomado de Suarez, J. (2009).....	32
Figura 2.2 Representación gráfica de la ecuación de Coulomb. Tomado de Suarez, J. (2009). .....	34
Figura 2.3 Circulo de Mohr para el caso límite de arenas secas. Tomado de Crespo, C. (2010). .....	34
Figura 2.4 Circulo de Mohr para el caso límite de arcillas blandas. Tomado de Crespo, C. (2010). .....	35
Figura 2.5 Tres posibles casos de estados tensionales en el círculo de Mohr. Tomado de González de Vallejos (2002). .....	35
Figura 3.1 Diagrama de flujo para la investigación y análisis de deslizamientos. Modificado de Japan Landslide Society, 1996 (Suarez, J., 2009).....	38
Figura 3.2 Formato para inventario de Fenómenos de Remoción en Masa (Carrera, S., Carlosama, F., 2017). .....	42
Figura 3.3 Gráfica resultante que contiene los valores de cohesión y ángulo de fricción de una muestra. ....	45
Figura 3.4 Gráfica esfuerzo cortante vs deformación lateral.....	46
Figura 3.5 Curva granulométrica de uno de los ensayos realizados en el laboratorio. ....	47
Figura 3.6 Análisis de estabilidad de taludes por el método de Bishop. Talud dividido en rebanadas o dovelas. Esquema de las fuerzas que actúan en una rebanada o dovela. Tomado de (González de Vallejo, L., et al, 2002). .....	49
Figura 3.7 Análisis de estabilidad de taludes por el método de Spencer. Diagrama de fuerzas y momentos. Tomado de (Catanzariti, F. 2016). .....	51
Figura 3.8 Análisis de estabilidad de taludes por el método de Janbú. Diagrama del factor $f_0$ utilizado en el método de Janbú. Tomado de (Sanhueza, P. C., et al. 2013)..	53
Figura 3.9 Histograma para el análisis de datos. ....	53
Figura 3.10 Análisis de tendencia de las gráficas. ....	54
Figura 3.11 Análisis de datos con kriging ordinario. ....	54
Figura 3.12 Interfaz del Software Slide 5.014. al ingresar los datos de un talud. ....	55
Figura 3.13 Interfaz del Software Slide 5.014. con las diferentes superficies de rotura posibles. ....	56
Figura 4.1 Mapa de ubicación de los 20 deslizamientos a lo largo del canal.....	58
Figura 4.2 Mapa de clasificación S.U.C.S. ....	60

Figura 4.3 Mapa con los diferentes rangos de cohesión. ....	63
Figura 4.4 Mapa con los diferentes rangos de ángulo de fricción. ....	64
Figura 4.5 Actividad sísmica (Neotectonic Open Database, PMA – GCA). ....	67
Figura 4.6 Mapa de pendientes de la zona de estudio. ....	69
Figura 4.7 Medidas de drenaje y protección de taludes (Uriel, 1991). Tomado de Gonzales de Vallejo et al., 2004. ....	73
Figura 4.8 Ejemplo de geotextiles tejidos con fibras sintéticas. Tomado del sitio web Maccaferri. ....	74
Figura 4.9 Geomallas producidos a partir de filamentos de poliéster y con resistencia a la tracción. Tomado del sitio web Maccaferri. ....	74
Figura 4.10 Geomembranas fabricada a partir de filamentos de polímeros como PVC. Tomado del sitio web Corpia. ....	75
Figura 4.11 Georedes de polietileno con dos geotextiles de prolipropileno. Tomado del sitio web Projar. ....	75
Figura 4.12 Perfil del talud D-011 sin ninguna intervención y en condiciones pseudostáticas. ....	77
Figura 4.13 Perfil del talud D-016 sin ninguna intervención. ....	78
Figura 4.14 Perfil del talud D-016 aplicando métodos de protección y remediación. ....	79
Figura 4.15 Perfil del talud DD-001 sin ninguna intervención. ....	80
Figura 4.16 Perfil del talud DD-001 aplicando métodos de protección y remediación. ....	81
Figura 4.17 Perfil del talud DD-004 sin ninguna intervención. ....	82
Figura 4.18 Perfil del talud DD-002 sin ninguna intervención. ....	84
Figura 4.19 Perfil del talud DD-002 aplicando métodos de protección y remediación. ....	84
Figura 4.20 Perfil del talud D-001 sin ninguna intervención. ....	85
Figura 4.21 Perfil del talud D-001 aplicando métodos de protección y remediación. ....	86
Figura 4.22 Perfil del talud D-002 sin ninguna intervención. ....	87
Figura 4.23 Perfil del talud D-002 aplicando métodos de protección y remediación. ....	88
Figura 4.24 Perfil del talud D-003 sin ninguna intervención. ....	89
Figura 4.25 Perfil del talud D-003 aplicando métodos de protección y remediación. ....	90
Figura 4.26 Perfil del talud D-004 sin ninguna intervención. ....	91
Figura 4.27 Perfil del talud D-004 aplicando métodos de protección y remediación. ....	92
Figura 4.28 Perfil del talud D-005 sin ninguna intervención. ....	93
Figura 4.29 Perfil del talud D-005 aplicando métodos de protección y remediación. ....	94
Figura 4.30 Perfil del talud D-012 sin ninguna intervención. ....	95
Figura 4.31 Perfil del talud D-012 aplicando métodos de protección y remediación. ....	96
Figura 4.32 Perfil del talud D-014 sin ninguna intervención. ....	97
Figura 4.33 Perfil del talud D-015 sin ninguna intervención. ....	99
Figura 4.34 Perfil del talud D-015 aplicando métodos de protección y remediación. ....	99
Figura 4.35 Perfil del talud DD-003 sin ninguna intervención. ....	101
Figura 4.36 Perfil del talud DD-003 aplicando métodos de protección y remediación. ....	101
Figura 4.37 Perfil del talud D-013 sin ninguna intervención. ....	103
Figura 4.38 Perfil del talud D-013 aplicando métodos de protección y remediación. ....	103
Figura 4.39 Perfil del talud D-006 sin ninguna intervención. ....	104
Figura 4.40 Perfil del talud D-006 aplicando métodos de protección y remediación. ....	105
Figura 4.41 Perfil del talud D-007 sin ninguna intervención. ....	106

Figura 4.42 Perfil del talud D-007 aplicando métodos de protección y remediación...	107
Figura 4.43 Perfil del talud D-008 sin ninguna intervención. ....	108
Figura 4.44 Perfil del talud D-008 aplicando métodos de protección y remediación...	108
Figura 4.45 Perfil del talud D-009 sin ninguna intervención. ....	109
Figura 4.46 Perfil del talud D-010 sin ninguna intervención. ....	111
Figura 4.47 Mapa con factores de seguridad antes (figura A) y después (figura B). ..	112

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1.1 Afloramiento de areniscas de grano fino de la Formación Pilatón. (UTM, WGS 84: 755542E; 15899N).....	21
Fotografía 1.2 Familia de diaclasas de la Formación Pilatón. (UTM, WGS 84: 755542E; 15899N) .....	22
Fotografía 1.3 Afloramiento de granodiorita de grano grueso del Batolito de Apuela. (UTM, WGS 84: 756798E; 18234N).....	22
Fotografía 1.4 Afloramiento de granodiorita del Batolito de Apuela, al pie se encuentra material meteorizado del mismo. (UTM, WGS 84: 756798E; 18234N).....	23
Fotografía 1.5 Medición de estructuras en afloramiento del intrusivo Apuela. (UTM, WGS 84: 756791E; 20236N).....	23
Fotografía 1.6 Vista panorámica de los lahares que cubren la zona. Fotografía tomada desde la margen izquierda del río Alambi. Desde (UTM, WGS 84: 756838E; 18164N). .....	25
Fotografía 1.7 Afloramiento del lahar indefinido bastante compacto donde se observa una matriz fina con bloques angulosos de origen ígneo. (UTM, WGS 84: 755815E; 17129N). .....	26
Fotografía 1.8 Suelo residual rellenando un paleocauce. Material orgánico encontrado en el aluvión. (UTM, WGS 84: 757079E; 18441N). .....	27
Fotografía 1.9 Suelo residual intercalado con material orgánico. (Desde UTM, WGS 84: 757203E; 18579N). .....	28
Fotografía 1.10 Afloramiento de Coluvial típico. (UTM, WGS 84: 756617E; 18742N)..	29
Fotografía 1.11 Deslizamiento vía Calacalí - La Independencia, km 54. Ocurrido el 8 de febrero de 2018, el cual dejó cuatro víctimas mortales (Fuente: Portal web Teleamazonas) .....	30
Fotografía 3.1 Caracterización y toma de datos de un talud afectado por un deslizamiento. (UTM, WGS 84: 757252E; 17661N). .....	41
Fotografía 3.2 Toma de muestra con tubo Shelby. (UTM, WGS 84: 757444E; 17596N). .....	44
Fotografía 3.3 Maquina con la que se realiza los ensayos de corte directo (figura de la izquierda). Preparación de las muestras para realizar ensayo de corte directo (figura de la derecha). .....	45
Fotografía 3.4 Tamices utilizados para los ensayos de laboratorio. ....	47
Fotografía 3.5 Cuchara de Casagrande utilizada para realizar el ensayo de límite líquido. (figura de la izquierda). Porción de suelo tomada para realizar el ensayo (figura de la derecha). .....	48
Fotografía 3.6 Cilindros resultantes del ensayo de límite plástico. ....	49

Fotografía 4.1 Materiales de naturaleza sensible y colapsable que causan pérdida de resistencia al corte del suelo. (UTM, WGS 84: 757041E; 21081N).	66
Fotografía 4.2 Deslizamiento D-011. (UTM, WGS 84: 757742E; 17383N).	76
Fotografía 4.3 Deslizamiento D-016. (UTM, WGS 84: 757594E; 17436N).	78
Fotografía 4.4 Deslizamiento DD-001. (UTM, WGS 84: 757444E; 17596N).	80
Fotografía 4.5 Deslizamiento DD-004. (UTM, WGS 84: 757332E; 17636N).	82
Fotografía 4.6 Deslizamiento DD-002. (UTM, WGS 84: 757252E; 17661N).	83
Fotografía 4.7 Deslizamiento D-001. (UTM, WGS 84: 757095E; 17830N).	85
Fotografía 4.8 Deslizamiento D-002. (UTM, WGS 84: 757106E; 17987N).	87
Fotografía 4.9 Deslizamiento D-003. (UTM, WGS 84: 757017E; 18195N).	89
Fotografía 4.10 Deslizamiento D-004. (UTM, WGS 84: 757038E; 18273N).	91
Fotografía 4.11 Deslizamiento D-005. (UTM, WGS 84: 757079E; 18441N).	93
Fotografía 4.12 Deslizamiento D-012. (UTM, WGS 84: 757083E; 18442N).	95
Fotografía 4.13 Deslizamiento D-014. (UTM, WGS 84: 757203E; 18579N).	97
Fotografía 4.14 Deslizamiento D-015. (UTM, WGS 84: 757224E; 18627N).	98
Fotografía 4.15 Deslizamiento DD-003. (UTM, WGS 84: 757243E; 18764N).	100
Fotografía 4.16 Deslizamiento D-013. (UTM, WGS 84: 757178E; 18793N).	102
Fotografía 4.17 Deslizamiento D-006. (UTM, WGS 84: 757050E; 19050N).	104
Fotografía 4.18 Deslizamiento D-007. (UTM, WGS 84: 757151E; 19103N).	106
Fotografía 4.19 Deslizamiento D-008. (UTM, WGS 84: 757079E; 19426N).	108
Fotografía 4.20 Deslizamiento D-009. (UTM, WGS 84: 757084E; 19736N).	109
Fotografía 4.21 Deslizamiento D-010. (UTM, WGS 84: 756742E; 20178N).	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Valores Pluviométricos mensuales de la estación Nanegalito M0339 (INAMHI, Anuario meteorológico 2012).	19
Tabla 3.1 Tomado de la NEC. Factores de seguridad por corte mínimos.	39
Tabla 3.2 Ubicación de los deslizamientos a lo largo del canal de conducción de agua.	43
Tabla 3.3 Numeración y orden de los tamices utilizados para la práctica del laboratorio.	46
Tabla 4.1 Inventario de FRM ocurridos a lo largo del canal de conducción de agua, junto con su ubicación, material inestable y otras características importantes.	57
Tabla 4.2 Resultados obtenidos del ensayo de la Clasificación S.U.C.S.	59
Tabla 4.3 Resultados obtenidos del ensayo de Límites de Atterberg.	61
Tabla 4.4 Parámetros obtenidos del ensayo de Corte Directo.	62
Tabla 4.5 Parámetros obtenidos del ensayo de Corte Directo.	65
Tabla 4.6 Variables utilizadas para el análisis de susceptibilidad.	68
Tabla 4.7 Valores ponderados de la variable pendiente.	68
Tabla 4.8 Valores ponderados de la variable litología.	69
Tabla 4.9 Valores promedio de precipitación mensual.	70
Tabla 4.10 Valoración del parámetro de humedad del terreno (Mora, R. et al., 1992).	70
Tabla 4.11 Valores ponderados de la variable geomecánica.	71

Tabla 4.12 Valores ponderados de susceptibilidad posibles para cada deslizamiento.	71
Tabla 4.13 Valores ponderados de susceptibilidad posibles para cada deslizamiento.	71
Tabla 4.14 Comparación de geosintéticos a través de su función principal. Tomado de Koerner, (2012).....	75
Tabla 4.15 Estabilidad de sitios en condiciones naturales actuales .....	111
Tabla 4.16 Comparación entre el análisis de susceptibilidad y el factor de seguridad obtenido. ....	113

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como principal objetivo realizar el estudio de los deslizamientos ocurridos a lo largo del canal de conducción de agua de la central hidroeléctrica Palmira, ubicada en la parroquia Nanegal a 76 km al norte de la ciudad de Quito. Se realiza un estudio de susceptibilidad y análisis de factor de seguridad para cada talud inestable, para lo cual se tomaron muestras en los deslizamientos de los cuales se realizaron 17 ensayos de corte directo, 15 ensayos S.U.C.S (granulometría por tamizado seco y límites de Atterberg). Los resultados permitieron realizar mapas geotécnicos superficiales con los parámetros Geomecánicos de cohesión, ángulo de fricción y la clasificación de suelos S.U.C.S, lo cual a su vez permitió determinar tres unidades geotécnicas: MH (materiales finos, principalmente limos y arcillas de alta plasticidad), SM (arenas bien clasificadas, con baja plasticidad), y ML (limos y arenas de media a alta plasticidad). Para el análisis de susceptibilidad se tomaron en cuenta la pendiente, litología, contenido de agua y propiedades geomecánicas; mientras que para el análisis de factor de seguridad se realizaron simulaciones con ayuda del software Slide 5.014 con parámetros geotécnicos y geológicos; y donde se concluye que los factores preponderantes que generan inestabilidad son la humedad del terreno y el factor geomecánico. Finalmente se recomienda medidas de estabilidad y se realiza una comparación entre la susceptibilidad y factor de seguridad.

Palabras claves: taludes, deslizamiento, susceptibilidad, factor de seguridad, estabilidad.

## **ABSTRACT**

The main objective for the present work is to make a study of the landslides that take place along the power canal of Palmira's Central Hydroelectric, located in Nanegal at 76 km northern of Quito city. Susceptibility study and factor of safety analysis were made for each unstable slope, samples were taken and, 17 direct shear soils laboratory tests and 15 S.U.C.S (particle size analysis with dry sieving and Atterberg limits) were performed. The results allowed to make shallow geotechnical maps with cohesion, internal friction and S.U.C.S parameters, and also these results provide information to classify 3 types of geotechnical units of soil: MH (fine grained material, mainly silt and clay with high plasticity), SM (well graded sand with low plasticity), and ML (silt and sand with medium to high plasticity). Slope, lithology, water content and geomechanich properties were analyzed for susceptibility study; while simulations by Slide 5.014 software with geologic and geotechnical parameters were used to analyze factor of safety; geomechanich factor and soil moisture are defined as two principal factors for instability. Finally, stability measures were recommended and a comparison between susceptibility and factor of safety.

Key words: slope, landslide, susceptibility, factor of safety, stability

# **CAPÍTULO I**

## **1 INTRODUCCIÓN**

La Hidroeléctrica Palmira (HPN) ubicada en la parroquia Nanegal a 76 km al norte de la ciudad de Quito, es un proyecto concebido como una obra de toma tipo azud (dique) a 996.5 msnm, con un caudal de diseño de 12 m<sup>3</sup>/s, un desarenador, un canal de conducción, un tanque de carga, tubería de presión y una casa de máquinas superficial. La caída bruta es de 93 m. La capacidad instalada es de 10 MW, con una generación anual de 65,7 GW. (Hidroequinoccio EP, 2013).

HPN tiene como objetivo el uso y aprovechamiento del río Alambi, río que se ubica en las estribaciones bajas de la cordillera Occidental y forma parte de la cuenca del río Esmeraldas; circula en sentido sur – norte y durante su trayecto sus aguas confluyen junto a las del río Pichán, río Saguangal y río Tulipe para finalmente desembocar en el río Guayllabamba.

Durante la construcción de HPN se presentaron varios deslizamientos en los taludes de corte a lo largo del canal de conducción, el cual posee 3548 m. de longitud, y donde los cortes llegan hasta 35 m de altura. Desde el año 2014 se han registrado deslizamientos que han afectado severamente la construcción del canal, y donde incluso existieron eventos con afectaciones a trabajadores del lugar. (Hidroequinoccio EP, 2014).

Garantizar la seguridad del equipo humano y de las instalaciones de la hidroeléctrica, es un trabajo de gran importancia, con un correcto estudio de estabilidad se puede asegurar un adecuado funcionamiento del canal de conducción donde se permita la libre circulación del agua y donde éste no se vea comprometido por escombros que pudieran generarse desde los taludes cercanos.

Dentro de los controles que se realiza en Ecuador para la construcción de una hidroeléctrica, está la inspección por parte del Ministerio del Ambiente del Ecuador, institución que solicita un informe sobre control y monitoreo de taludes para solventar parte de las medidas ambientales que constan en el plan de manejo ambiental, por lo que la intención de este proyecto es realizar un análisis de estabilidad de taludes específicamente en la zona del canal de conducción de HPN. Se realizará un inventario de los deslizamientos ocurridos hasta la fecha el cual incluye ubicación (coordenadas geográficas y abscisas), fecha de ocurrencia, grado de actividad, tipo de fenómeno, factores desencadenantes, tipo de material, tipo de daño, y cobertura. Se realizará



además clasificaciones litoestratigráficas, que en conjunto con modelaciones efectuadas mediante un software especializado permitirá comparar los métodos análisis de la estabilidad de taludes según: Bishop, Janbú y Spencer para definir la situación más próxima a la realidad.

Finalmente, este estudio permitirá determinar los lugares donde se requiere de intervención para definir las medidas de mitigación y estabilidad que se debe aplicar, según sea el caso, y que junto al mapa geotécnico superficial y de pendientes, podrán ser utilizados por Hidroequinoccio EP para garantizar el funcionamiento eficiente de la hidroeléctrica a través de un canal de conducción menos vulnerable a fenómenos de remoción en masa.

## **1.1 Justificación**

### **1.1.1 Justificación Teórica**

Los fenómenos de remoción en masa (FRM) son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan en gran magnitud a la infraestructura creada por el ser humano y, que además causan gran número de muertes, alcanzando daños estimados en decenas de billones de dólares cada año (Brabb y Harrod, 1989).

Los fenómenos de remoción en masa están relacionados a eventos tectónicos, al tipo de material y al clima del lugar, que combinados de cierto modo pueden ser factores desencadenantes.

Dentro del área de estudio existen registros de sismos de magnitudes menores a 5Mb, sin embargo, existen dos fallas relevantes (fuentes sismo-genéticas), y que estarían relacionados a la falla Nanegalito y Apuela (Nuñez, 2011).

El tipo de material que se encuentra en la zona de estudio corresponde a depósitos Cuaternarios que se encuentran en contacto discordante sobre el batolito Apuela – Nanegal y fueron formados debido a la actividad fluvial del lugar. Los depósitos que se encuentran son lahares, avalanchas volcánicas y aluviales. (Nuñez, 2011).

Considerando los antecedentes señalados, este trabajo busca aportar nuevos datos en cuanto a la geología local de la zona de Nanegal, y principalmente generar datos sobre la evaluación de estabilidad de los cortes de taludes construidos a lo largo del canal de conducción de la Hidroeléctrica Palmira en la parroquia de Nanegal.

### **1.1.2 Justificación Metodológica**

El presente estudio se enfocará en la caracterización geotectónica de los taludes que se encuentran a lo largo del canal de conducción, estudios con los cuales se pretende entender de mejor manera la naturaleza del lugar, la dinámica y delimitación de los

fenómenos de remoción en masa, para de esta manera generar medidas de mitigación para coadyuvar a la optimización del funcionamiento de la hidroeléctrica.

### **1.1.3 Justificación Práctica**

Para el desarrollo de un proyecto es necesario que existan estudios que garanticen la seguridad de la obra, de los trabajadores que laboran allí y de las comunidades aledañas, más aún cuando éstas brindan un servicio a la sociedad.

El desarrollo de este trabajo permitirá que las operaciones en la hidroeléctrica se realicen con normalidad y sin sobre tiempos causados por deslizamientos, además de generar seguridad a la comunidad aledaña.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar la estabilidad de los taludes de corte en el canal de conducción de la Hidroeléctrica Palmira en la parroquia Nanegal, mediante la caracterización geológica – geomecánica de los materiales que los componen.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar y caracterizar las propiedades físico – mecánicas de los diferentes materiales que conforman los sitios donde se desarrollan fenómenos de remoción en masa, mediante información bibliográfica y trabajos en campo.
- Generar modelos de estabilización estática y pseudoestática para el análisis del factor de seguridad de los taludes.
- Recomendar medidas correctivas o de estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos en masa.
- Generar un mapa geotécnico superficial de suelos y un mapa de pendientes para evaluar la susceptibilidad de los diferentes taludes ante fenómenos de remoción en masa.

## **1.3 Descripción de la zona de estudio**

### **1.3.1 Ubicación**

El área de estudio está ubicada al noroccidente de la Provincia de Pichincha, en la parroquia Nanegal del cantón Quito; comprende una superficie de 27 km<sup>2</sup>, y está delimitada por las coordenadas 10021704, 10016375 latitud norte y 755308, 760371 longitud oeste. (Figura 1.1).

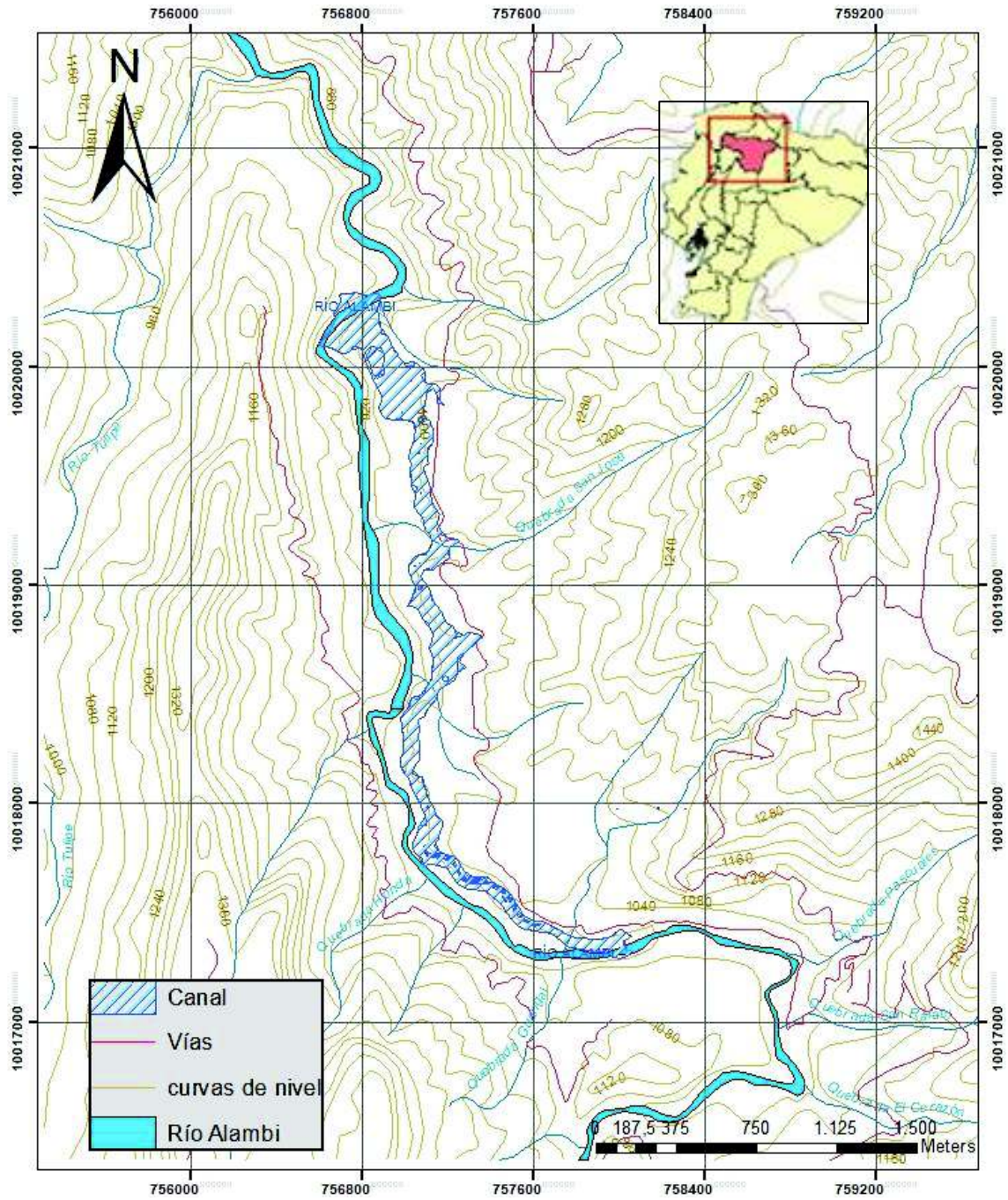


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio

Dentro de la zona de trabajo se encuentra el Proyecto Hidroeléctrico Palmira Nanegal que tiene como objetivo el uso y aprovechamiento del río Alambi.

### 1.3.2 Aspecto Físico Precipitación

Para detallar las precipitaciones del lugar se consideró la estación de Nanegalito M0339:

Tabla 1.1 Valores Pluviométricos mensuales de la estación Nanegalito M0339 (INAMHI, Anuario meteorológico 2012).

<b>Mes</b>	<b>Valores pluviométricos (mm)</b>
Enero	543.6
Febrero	442.4
Marzo	298.3
Abril	315.5
Mayo	145.7
Junio	88.4
Julio	42.6
Agosto	8.9
Septiembre	14.5
Octubre	81.3
Noviembre	177.0
Diciembre	53.3
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>2211.5</b>
<b>Máxima en 24 horas</b>	<b>90.5</b>

De acuerdo al anuario meteorológico del INAMHI del 2012, (tabla 1), los meses donde se registran mayores precipitaciones son desde enero hasta abril, y los meses de bajas precipitaciones corresponden a los meses desde julio hasta septiembre.

### **Clima**

Las máximas temperaturas que se alcanzan en la zona varían entre 26 °C - 30 °C, mientras que las temperaturas mínimas oscilan entre 10 °C – 12 °C. En cuanto a la temperatura media durante el año varía entre 18 °C y 20 °C. (Calle S., Jaguaco J., 2009).

#### **1.3.3 Geología Local**

Dentro de la geología local cabe destacar la presencia del río Alambi, el cual se mueve en dirección sureste - noreste recorriendo 2,8 km, luego cambia su dirección formando una “U” (Este, Norte, Oeste) y retoma su curso en una dirección Sur-Norte con una pequeña desviación al Oeste. (Figura 1.2)

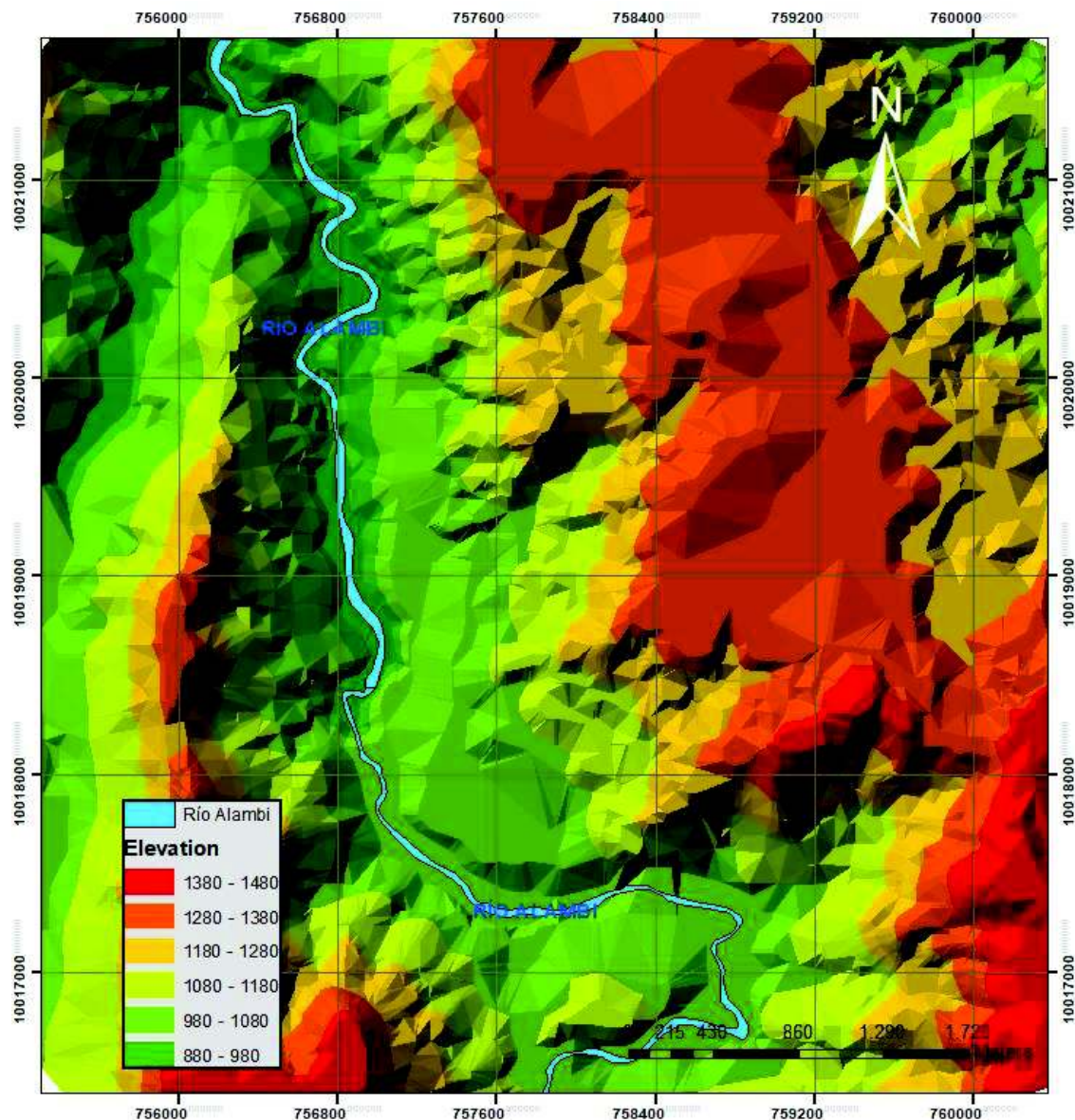


Figura 1.2 Mapa que resalta la trayectoria del río Alambi y las diferentes alturas del lugar.

Las alturas del terreno varían desde 875 a 1500 msnm. Predomina una planicie alargada alta en la margen izquierda del río Alambi, mientras que al Sur y Este, el relieve se torna suave y redondeado. (Hidroequinoccio EP, 2013).

### 1.3.4 Litoestratigrafía

Tanto el levantamiento geológico como el estudio geotécnico fueron realizados a partir mayo de 2017 hasta noviembre del mismo año; las salidas de campo comprenden de descripciones de afloramientos, descripción y recolección de muestras, y toma de medidas estructurales.

El área de estudio forma parte de la Cordillera Occidental. La formación Pilatón y el batolito de Apuela afloran en el lugar; depósitos fluviales del cuaternario cubren la mayor parte de la zona estudiada. En su estudio Nuñez (2011), logró asignar edades a estos depósitos fluviales: Pleistoceno inferior, medio, superior y Holoceno.

La descripción de cada uno se da a continuación:

## Formación Pilatón

Los trabajos previos relacionados a esta formación incluyen a Hughes y Bermúdez (1997), quienes definen a Pilatón como una secuencia turbidítica estratificada de gran espesor. Durante el Informe Geológico N° 10 (2000), a partir de un estudio de tres muestras, se determinaron edades de Campaniano – Eoceno, Maastrichtiano y Paleoceno, donde el mayor grado de seguridad es dado para la edad de Maastrichtiano. (Boland, M., et al 2000).

La Formación Pilatón está compuesta por areniscas turbidíticas estratificadas de gran espesor las cuales son ricas en fragmentos volcánicos, y microbrechas que contienen fragmentos de líticos volcánicos. Las areniscas fueron depositadas por flujos de turbidita de alta densidad, los cuales retrabajaron a las tefras que se encontraban antes allí. (Vallejo, C., 2007).

Para el reconocimiento y estudio de esta formación, se realizó trabajo de campo en las orillas del río Blanco, donde se encontraron afloramientos de areniscas de color gris a gris verdoso, rocas bien consolidadas, con textura de grano fino. (Fotografía 1.1).



Fotografía 1.1 Afloramiento de areniscas de grano fino de la Formación Pilatón. (UTM, WGS 84: 755542E; 15899N)

Las rocas muestran un alto grado de fracturamiento superficial y una marcada foliación, su estratificación presenta por lo general una dirección de N30°W, con buzamientos de alrededor de 60° al SW. (Nuñez, C., 2011). (Fotografía 1.2).



Fotografía 1.2 Familia de diaclasas de la Formación Pilatón. (UTM, WGS 84: 755542E; 15899N)

### **Batolito Apuela Nanegal**

El batolito Apuela Nanegal es un gran cuerpo intrusivo con 50 km de longitud y 10-20 km de ancho, tiene una dirección N-S, corta transversalmente al Toachi, y falla e intruye a las unidades Pilatón y Mulaute hacia el este, y a la unidad Naranjal hacia el oeste. (Boland, M., et al 2000). El batolito Apuela Nanegal se ve afectado por el paso de la falla Apuela, la cual tiene una longitud de 53,8 km a 75 km, está dividida en tres secciones y tiene una dirección de movimiento principal del tipo dextral. (Eguez, A. 2003). Vallejo (2007) ubica al batolito en una edad de Eoceno Medio, relacionándolo al arco volcánico Macuchi.



Fotografía 1.3 Afloramiento de granodiorita de grano grueso del Batolito de Apuela. (UTM, WGS 84: 756798E; 18234N).

El batolito se caracteriza por estar constituido principalmente de granodioritas y localmente por rocas de tipo tonalita y cuarzo dioritas, todas de grano grueso a medio con hornblenda/biotita, minerales como la augita y la esfena también han sido reportados. (Boland, M., et al 2000). (Fotografía 1.3).

Durante el trabajo de campo se encontró que la granodiorita aflora en varios sitios a lo largo de la vía, además de la margen derecha e izquierda del río Alambi. Producto de la meteorización la roca tiene una morfología de lomas semi redondeadas. Existen sitios donde la roca se mantiene bien consolidada, es decir se encuentra roca fresca sin alteraciones, pero también existen lugares donde la meteorización es más avanzada, y a pesar de que la roca conserva su estructura y apariencia, al golpe del martillo se disgrega con gran facilidad a tamaños de grano de arena gruesa. (Fotografía 1.4).



Fotografía 1.4 Afloramiento de granodiorita del Batolito de Apuela, al pie se encuentra material meteorizado del mismo. (UTM, WGS 84: 756798E; 18234N).

Durante el estudio del batolito Apuela Nanegal, se observó que éste se encuentra generalmente fracturado, se realizaron mediciones estructurales de las diaclasas y se pudo determinar la existencia de cuatro principales familias. (Fotografía 1.5)



Fotografía 1.5 Medición de estructuras en afloramiento del intrusivo Apuela. (UTM, WGS 84: 756791E; 20236N).



En total se obtuvieron 102 mediciones que al ser procesadas con el Software Dips, arrojaron las siguientes concentraciones de sus orientaciones: NE  $\pm$  SE, NE  $\pm$  SW, y NW  $\pm$  NE. (Figura 1.3).

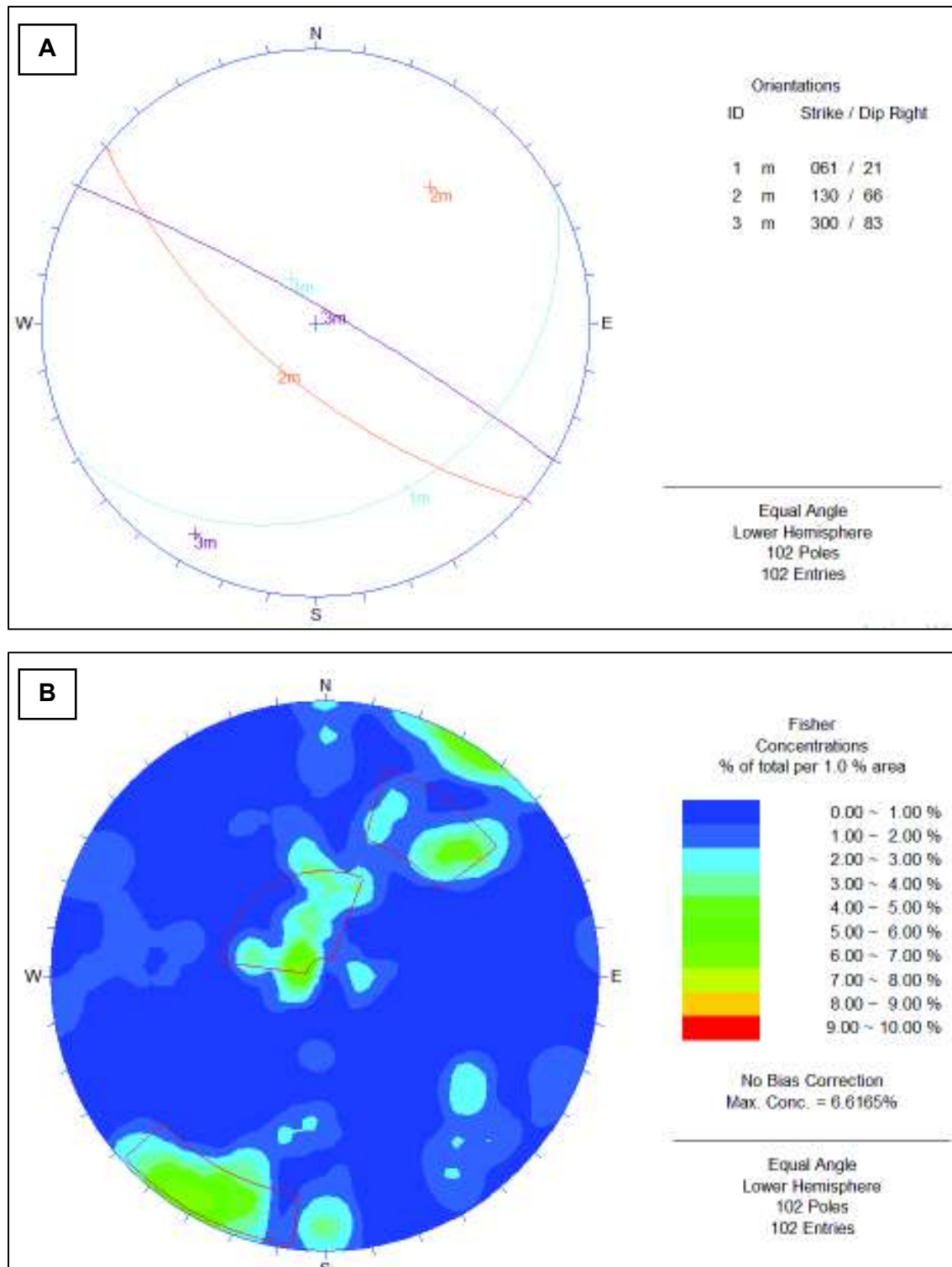


Figura 1.3 Estereograma con las 102 medidas estructurales, generando los planos y polos de las cuatro principales familias de diaclasas (Figura A). Concentración de polos y criterios para determinar las tres familias de diaclasas (Figura B). Medidas tomadas a la entrada del campamento de la hidroeléctrica (UTM, WGS 84: 758419E; 17473N).

### 1.3.5 Geología del Cuaternario del área de estudio.

Los depósitos cuaternarios se han formado a partir del material que ha sido acarreado y se ha depositado debido a diferentes formas de erosión, siendo la más importante la erosión fluvial. La acumulación del material detrítico se debe principalmente al aporte del arco volcánico continental de los Andes.

Dentro de la zona de estudio los depósitos cuaternarios cubren la mayor parte del territorio y están conformados por lahares, coluviales, aluviales antiguos y recientes, y suelo residual.

#### Lahares indiferenciados

Suarez, (2009) define palabra lahar, como un término para identificar flujos de materiales volcánicos que pueden producirse por erupciones volcánicas, derretimiento de nieve o hielo, erosión de los depósitos sueltos volcánicos en los eventos de lluvias intensas, por sismos que generan licuación en los suelos volcánicos o por la rotura de lagos en los depósitos volcánicos.

Estos depósitos cuaternarios se presentan como depósitos muy consolidados que forman paredes sub verticales que alcanzan los 100m de alto. Ocupan las cotas entre 1200 y 1300 msnm y estratigráficamente son posteriores al batolito Apuela. (Fotografía 1.6). Núñez, (2011) los ubica en el pleistoceno inferior.



Fotografía 1.6 Vista panorámica de los lahares que cubren la zona. Fotografía tomada desde la margen izquierda del río Alambi. Desde (UTM, WGS 84: 756838E; 18164N).

Está formado por una matriz fina que contiene detritos de textura brechosa y origen ígneo, probablemente de composición dacítica. (Fotografía 1.7)



Fotografía 1.7 Afloramiento del lahar indefinido bastante compacto donde se observa una matriz fina con bloques angulosos de origen ígneo. (UTM, WGS 84: 755815E; 17129N).

### **Depósitos Fluviales**

Son definidos como materiales transportados y depositados por el agua. Su tamaño varía desde la arcilla hasta las gravas gruesas, cantos y bloques. Son suelos muy anisótropos en su distribución, con propiedades geotécnicas altamente variables, estrechamente relacionadas con la granulometría. Su continuidad es irregular, pudiendo tener altos contenidos en materia orgánica en determinados medio. La permeabilidad depende de la granulometría. Generalmente presentan un nivel freático alto. (González de Vallejo, et al. 2002).

Dentro de la zona de estudio, los depósitos aluviales presentan bloques redondeados de andesita o granodiorita, que alcanzan tamaños de hasta 5m aproximadamente; tienen una matriz de grano fino probablemente de la meteorización del batolito. Y se encuentran ocupando las cotas entre 800 y 300 msnm. Núñez. (2011) los ubica dentro del Holoceno.

En la figura 1.8 se puede observar un suelo residual de grano fino, tipo arena que está ocupando el espacio de un paleocauce formado en un aluvión. Dentro del aluvión se encontró material orgánico formado por restos de raíces y troncos.



Fotografía 1.8 Suelo residual rellenando un paleocauce. Material orgánico encontrado en el aluvión. (UTM, WGS 84: 757079E; 18441N).

## Suelos Residuales

Los suelos residuales se forman in situ a partir de meteorización mecánica y química de las rocas subyacentes. Estos suelos son comunes en zonas tropicales, como ocurre en la zona de estudio, donde se observa que a partir de la meteorización de la granodiorita Apuela – Nanegal las plagioclasas, feldespatos y micas se caolinizan transformándose en minerales del grupo de la caolinita, minerales arcillosos. Generalmente tienen una granulometría limo – arcilloso y limo – arenosa. Corresponden a suelos con colores que varían entre amarillo, gris, café oscuro y ocre. (Fotografía 1.9).

Se encuentran depósitos de suelos residuales de hasta 15m de altura y es donde generalmente se producen fenómenos de remoción en masa. Cronológicamente se los ubica en el Holoceno.



Fotografía 1.9 Suelo residual intercalado con material orgánico. (Desde UTM, WGS 84: 757203E; 18579N).

### **Depósitos Coluviales**

Son materiales transportados por gravedad, la acción del hielo-deshielo y, principalmente, por el agua. Su origen es local, producto de una alteración in situ de las rocas y posterior transporte como derrubios de ladera o depósitos de solifluxión. Frecuentemente están asociados a masas inestables. Su composición depende de las rocas de la que proceden, estando formados por fragmentos angulares y heterométricos, generalmente de tamaño grueso, englobados en una matriz limo arcillosa. Su espesor suele ser escaso, aunque puede ser muy variable. (González de Vallejo, et al. 2002).

Los coluviales se han formado por el desprendimiento de rocas y suelo debido a la erosión y clima del lugar; en general son materiales muy susceptibles a deslizamientos como se puede notar en las carreteras de la zona donde se producen constantes fenómenos de remoción en masa.

Están constituidos por bloques sub redondeados y una matriz muy fina, la cual debido a su grado de compactación genera una permeabilidad y transmisibilidad baja. (Fotografía 1.10).



Fotografía 1.10 Afloramiento de Coluvial típico. (UTM, WGS 84: 756617E; 18742N).

### **1.3.6 Inestabilidad en taludes**

Los fenómenos de remoción en masa (FRM) son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan en gran magnitud a la infraestructura creada por el ser humano y, que además causan gran número de muertes, alcanzando daños estimados en decenas de millones de dólares cada año (Brabb y Harrod, 1989).

Se considera que el daño que producen los FRM suele ser aún mayor que el daño causado por las inundaciones y terremotos, sin embargo, este tipo de desastres pueden ser evitados si se aplican las medidas necesarias para prever, prevenir y mitigar pérdidas. Los lugares que se encuentran influenciados por sistemas montañosos son susceptibles a ser afectados por este tipo de fenómenos, y de manera especial los lugares con clima tropical donde son más recurrentes tres de los cuatro elementos más importantes para la ocurrencia de deslizamientos: relieve alto, lluvias intensas, meteorización y sismicidad. (Suarez J, 2009).

La zona del noroccidente de Quito, es en general una zona vulnerable a amenazas por fenómenos de remoción en masa; dentro de la vía Calacalí – La Independencia se registran anualmente varios deslizamientos, los cuales incluso dejan como consecuencia pérdidas humanas. (Fotografía 1.11).



Fotografía 1.11 Deslizamiento vía Calacalí - La Independencia, km 54. Ocurrido el 8 de febrero de 2018, el cual dejó cuatro víctimas mortales (Fuente: Portal web Teleamazonas)

A pesar de representar una grave amenaza para la sociedad, la información relacionada a fenómenos de remoción en masa es limitada, los trabajos son escasos o existe poca consistencia entre los diferentes trabajos, como se puede evidenciar con los mapas que se han realizado en diferentes países del mundo, o por diferentes instituciones de un país, donde la terminología que se aplica no es uniforme. (Proyecto Multinacional Andino, 2004).

## **CAPITULO II**

### **2 MARCO CONCEPTUAL**

#### **2.1 Conceptos Generales**

##### **Principales tipos de suelos**

Con el fin de facilitar el estudio del suelo, se lo ha clasificado de acuerdo a su granulometría (Normas D.I.N., A.S.T.M., A.E.N.O.R.).

##### **Gravas**

Son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y tienen un diámetro que varía entre 2 mm y 8-10 cm; se caracterizan porque los granos son observables directamente. No retienen el agua debido a los grandes huecos entre sus partículas.

La forma de las partículas de las gravas depende de la historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos redondeados a angulares.

##### **Arenas**

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, con partículas comprendidas entre 2 y 0,060 mm, todavía son observables a simple vista.

Las arenas cuando están limpias presentan características muy particulares, cuando se mezclan con el agua no se forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad, al secarse no se contraen, no son plásticas, son mucho menos comprensibles que la arcilla y al aplicar una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

##### **Limos**

Los limos son suelos de granos finos con partículas comprendidas entre 0,060 y 0,002 mm, algunas normativas indican que este último valor debe ser 0,005 mm sin que haya efectos adversos durante la práctica entre ambas medidas.

Retienen el agua mejor que los tamaños superiores, sin embargo, su permeabilidad es muy baja y su comprensibilidad muy alta, si se forma una pasta de limo con agua y se coloca sobre la mano, al golpear se puede ver como se exuda con facilidad.

Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas (cimentaciones superficiales); y de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

##### **Arcillas**

Las arcillas son partículas sólidas con diámetro menor a 0.002 mm. Se trata ya de partículas de tamaño gel que necesariamente fueron sometidas a un proceso de transformaciones químicas para alcanzar estos tamaños; químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque también, pueden ser silicatos de hierro o magnesio hidratados, forman cadenas tetraédricas y octaédricas, donde sus átomos están dispuestos en forma de lámina.

En general, las arcillas son altamente plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son comprensibles y al aplicarse una carga se



comprimen lentamente; tienen alta capacidad de retención del agua, por lo que son habitualmente los materiales que más problemas generan al momento de la construcción. Otra característica relevante para la construcción, es la capacidad de recuperar parcialmente la resistencia perdida por el remolde, conocida como tixotropía

## 2.2 Talud o ladera

El término ladera hace referencia a una masa de tierra que presenta pendiente o cambios significativos en su altura y su origen es atribuido a procesos naturales a diferencia de los taludes que se han formado de manera artificial por intervención humana. (Figura 2.1).

Contrario a lo que se cree, los taludes y laderas son sistemas que se encuentran en constante evolución, cuerpos que se han encontrado por mucho tiempo en reposo que pueden presentar movimientos repentinos debido a factores disparadores como sismos, presencia de agua subterránea, cambios en la topografía causados por acciones naturales o antrópicas, etc., por lo que es necesario conocer la dinámica de su funcionamiento para diagnosticar su comportamiento y realizar un análisis y diseño de obras de estabilización enfocadas a la construcción de obras civiles e infraestructura.

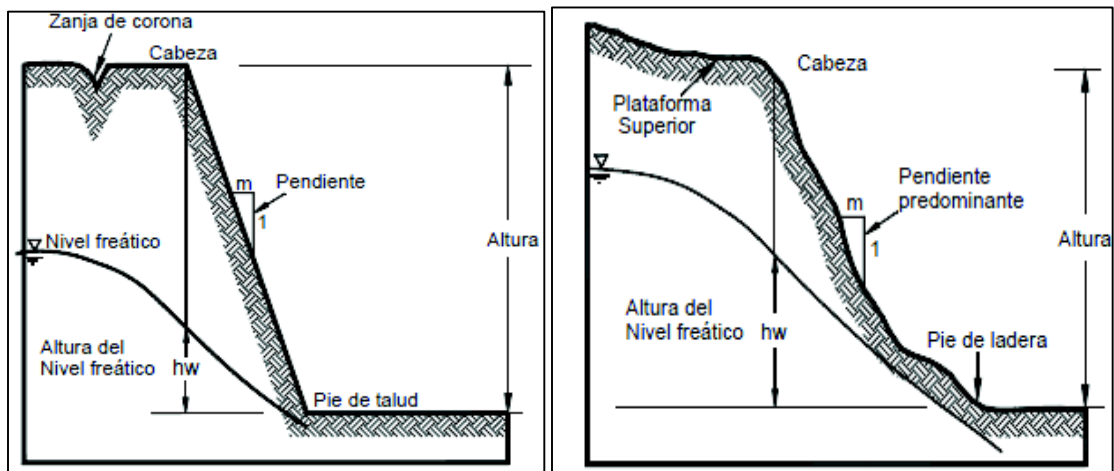


Figura 2.1 Ilustraciones que diferencian un talud (izquierda) de una ladera (derecha), junto con las partes de cada uno. Tomado de Suarez, J. (2009).

## 2.3 Clasificación de movimientos

Existen varias nomenclaturas basadas en aspectos que incluyen el tipo de material, mecanismos de movimiento, grado de deformación del material y el grado de saturación; para el presente estudio tomaremos en cuenta la clasificación de Hutchinson (1968) y Varnes (1958 y 1978) debido a que es un sistema ampliamente aceptado a nivel mundial y utilizado para los estudios geotécnicos.

Varnes (1958 y 1978) toma en cuenta dos factores principales para su clasificación: el tipo de movimiento y el tipo de material, teniendo como resultado cinco tipos de movimientos en masa: caídas, volcamientos, deslizamientos, propagación y flujos.

Además, divide los materiales en dos clases: rocas y suelos; estos últimos divididos a su vez en detritos y tierra.

## 2.4 Mecánica de suelos

La mecánica de suelos estudia la acción de las fuerzas sobre la masa de los suelos. Según Karl Terzaghi, la mecánica de suelos es la aplicación de la teoría y leyes de la

mecánica e hidráulica, para resolver problemas ingenieriles relacionados con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, formadas a partir de meteorización química o física. (Crespo, C., 2010).

Las actividades humanas sobre los diferentes medios geográficos alteran las condiciones naturales del suelo, haciendo que éste reaccione de determinada manera dependiendo de sus características intrínsecas y condiciones del entorno.

Desde el punto de vista de la ingeniería geológica, el suelo se define como un agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua. (González de Vallejo, L., et al, 2002).

La respuesta del suelo depende de:

- La proporción de materia sólida que existe en un volumen unitario de suelo de referencia.
- El tamaño y distribución de las partículas, lo que facilita o dificulta el movimiento de los granos entre sí.
- El volumen relativo de huecos, a mayor número de vacíos el suelo es más deformable.
- El tamaño medio de los huecos.

## 2.5 Resistencia al Corte

Es errado considerar a la resistencia al corte del suelo como un parámetro constante y único, debido a que éste depende de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones; y principalmente de su estado tensional y de la presión de fluido que rellena sus poros (agua o agua y aire). (González de Vallejo, L., et al, 2002).

La teoría que más ha sido difundida es la propuesta por Coulomb (figura 2.2), donde se afirma que si una muestra de suelo es sometida a un esfuerzo de corte, ésta tiende a producir un desplazamiento de sus partículas entre sí o con respecto a la masa total del suelo; la resistencia al corte  $\tau$  de un suelo viene dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \cdot \tan\phi$$

En la que:

$\tau$ : resistencia al corte del suelo a favor de un determinado plano

$c$ : Cohesión del suelo efectiva

$\sigma$ : Tensión total normal actuando sobre el mismo plano

$\mu$ : presión del agua intersticial o de poros

$\phi$ : ángulo de fricción interna del suelo, el cual se supone que es constante.

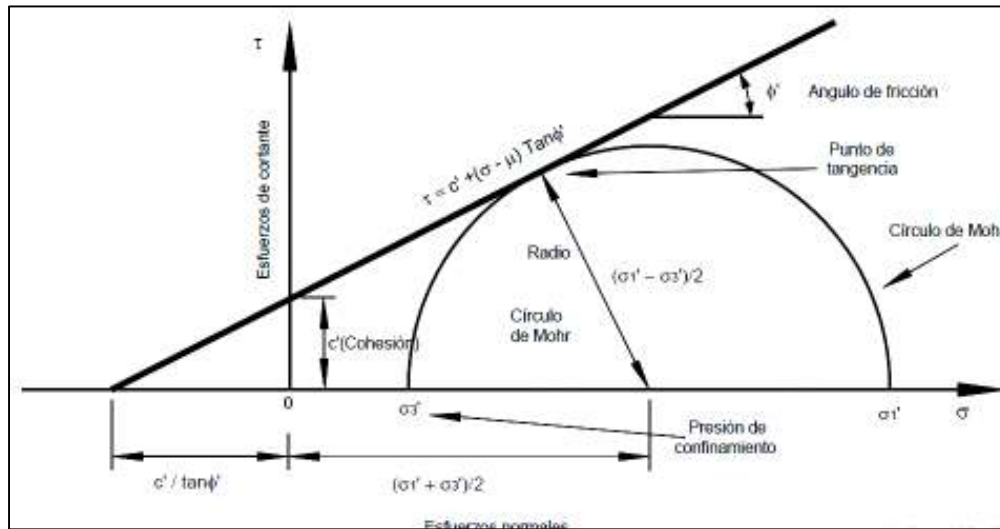


Figura 2.2 Representación gráfica de la ecuación de Coulomb. Tomado de Suarez, J. (2009).

La ecuación de Coulomb representa una recta en el espacio  $(\sigma, \tau)$  que se denomina línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo; esta línea proporciona, para cada valor de la tensión efectiva normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo, la máxima tensión tangencial movilizable a favor de dicho plano. (González de Vallejo, L., et al, 2002).

Existen dos casos límites en el criterio de rotura de suelos:

- Las arenas lavadas y secas que no poseen cohesión, en las que la carga de rotura se produce para un valor de:

$$\tau = (\sigma - \mu) \cdot \tan \phi$$

pasando por el origen la envolvente del círculo de Mohr (figura 2.3).

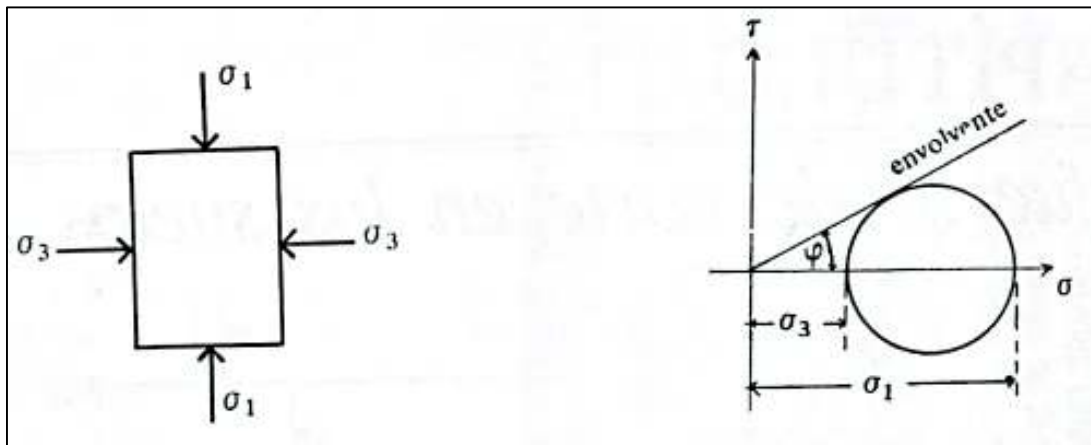


Figura 2.3 Círculo de Mohr para el caso límite de arenas secas. Tomado de Crespo, C. (2010).

- Las arcillas blandas, las que se comportan como si el ángulo de fricción interna fuese igual a cero, resultando la carga de rotura constante e igual a la cohesión del suelo, (figura 2.4).

$$\tau = c$$

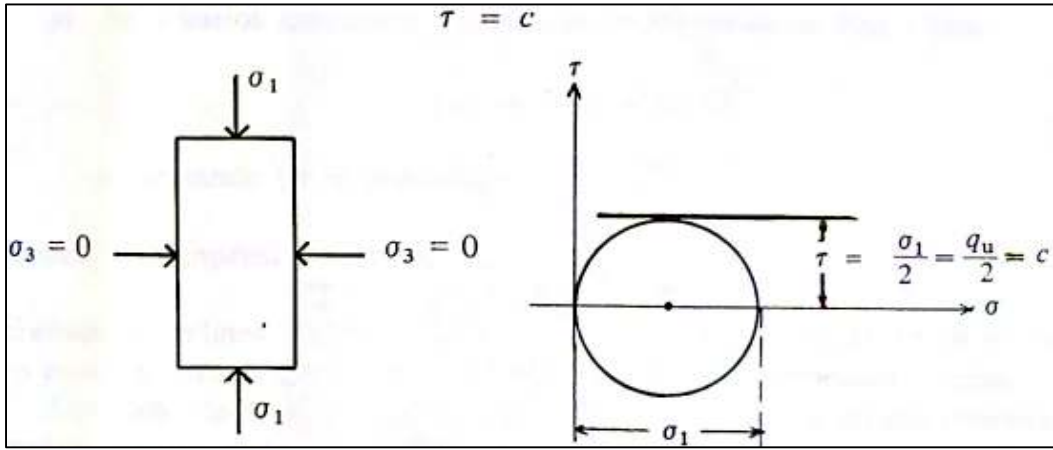


Figura 2.4Círculo de Mohr para el caso límite de arcillas blandas. Tomado de Crespo, C. (2010).

Donde:

$\sigma_1$  y  $\sigma_3$ : esfuerzos principales

$q_u$ : esfuerzo unitario de rotura a compresión no confinada

Tomando en cuenta los conceptos del tensor de esfuerzos y el círculo de Mohr, se pueden relacionar las condiciones de rotura en un plano dado con las tensiones actuantes a favor de otros planos.

En la figura 2.5 se representan tres estados tensionales de un elemento de un suelo, donde al analizar los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna se determina que:

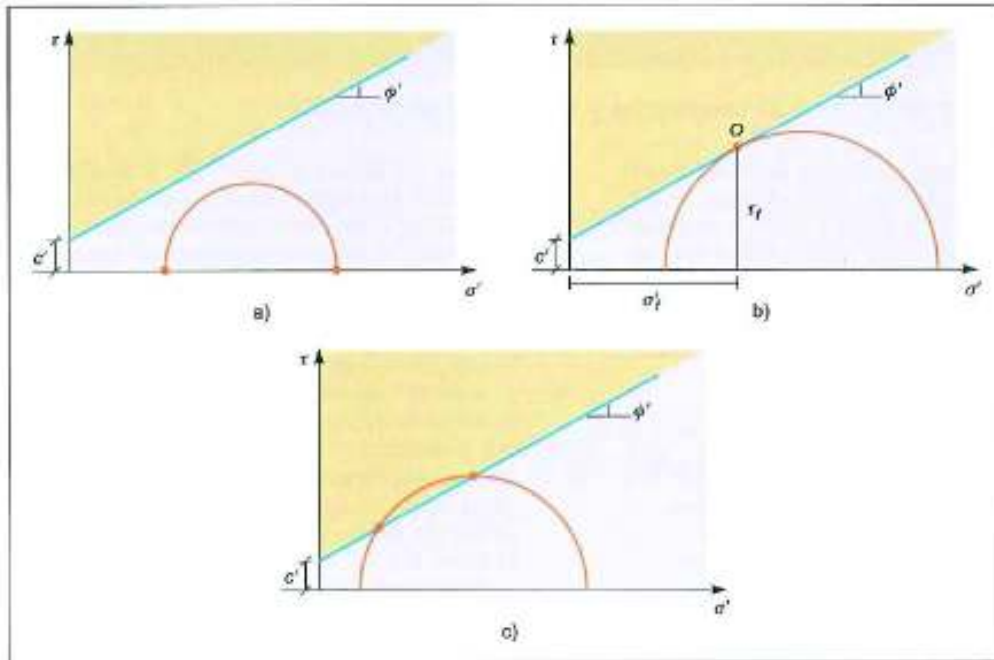


Figura 2.5Tres posibles casos de estados tensionales en el círculo de Mohr. Tomado de Gonzáles de Vallejos (2002).

- El estado tensional (a) (figura 2.5), representa una situación posible y segura, ya que no se llega a alcanzar la envolvente de rotura del suelo.
- El estado tensional (b) (figura 2.5), representa una situación de rotura, donde existe una combinación de  $(\sigma_f, \tau_f)$ .
- El estado tensional (c) (figura 2.5), representa una situación imposible, ya que existirían orientaciones de planos atravesando el elemento de suelo en varios puntos excediendo las condiciones de  $(\sigma_f, \tau_f)$ .

En general se puede determinar que cuando se alcanzan condiciones de rotura, el círculo de Mohr que representa su estado tensional será tangente a la línea de resistencia intrínseca, y el plano donde se alcanzan estas condiciones está representando por el punto de tangencia.

## 2.6 Cohesión y ángulo de fricción interna

### Cohesión

Se puede definir la cohesión como la adherencia entre las partículas del suelo debido a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares (Crespo, 2010).

La cohesión en la mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas. (Suarez, 2009).

### Ángulo de fricción interna

El ángulo de fricción interna es un valor introducido por convenio y se lo considera constante, depende de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y forma de los granos y de la presión normal. (Crespo, 2010).

## 2.7 Factor de seguridad

También conocido como coeficiente de seguridad, se define como un valor que indica la relación entre las fuerzas de resistencia al corte y las fuerzas que estimulan el deslizamiento (desestabilizantes), en un talud o ladera. (P. M. A., 2007).

Das, B. M. (2001), define al factor de seguridad con la siguiente ecuación:

$$FSS = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde:

$FSS$ : factor de seguridad con respecto a la resistencia.

$\tau_f$ : resistencia cortante promedio del suelo.

$\tau_d$ : esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

# CAPÍTULO III

## 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para generar un estudio de análisis de estabilidad de un talud es necesario realizar previamente una investigación sobre todos los datos relacionados a la geología, geografía, topografía y características geotécnicas de los materiales del lugar de interés que faciliten realizar un diagnóstico del problema lo más preciso posible y un diseño efectivo de su solución o remediación.

Según Suarez, J. (2009) son necesarios tres aspectos para evaluar la estabilidad de un talud: definir en tres dimensiones las características de la masa inestable prestando particular atención a las superficies de corte y planos de falla; analizar las propiedades y características de los materiales y de los elementos activadores; y detectar los movimientos de, o dentro de la masa inestable y monitorearlo.

Debido a la mediana magnitud y gran complejidad de los taludes del área de estudio, fue necesario realizar varios muestreos de los materiales de la zona, además de varias salidas de campo que permitieron reconocer y entender de mejor manera la problemática del lugar, y de esta manera generar una solución que se adecúe de mejor forma a las condiciones técnicas, de infraestructura, ambientales, sociales y económicas.

### 3.1 Organización del estudio

Siguiendo la metodología descrita por Suarez, J. (2009) se recomienda seguir las siguientes etapas en el estudio de evaluación taludes (Figura 3.1):

- Reconocimiento e identificación del sitio.
- Análisis de la información existente.
- Estudio de las características superficiales del sitio que permitan la caracterización topográfica y geotécnica.
- Investigación de campo que incluya toma de muestras y ensayos in situ para cuantificar los parámetros del suelo.
- Investigación de laboratorio.
- Modelación matemática utilizando software.
- Instrumentación y monitoreo.
- Elaboración del plan de manejo y diseño de obras de remediación.

Debido al alcance del trabajo, las dos últimas etapas de la evaluación de taludes no se llevarán a cabo.

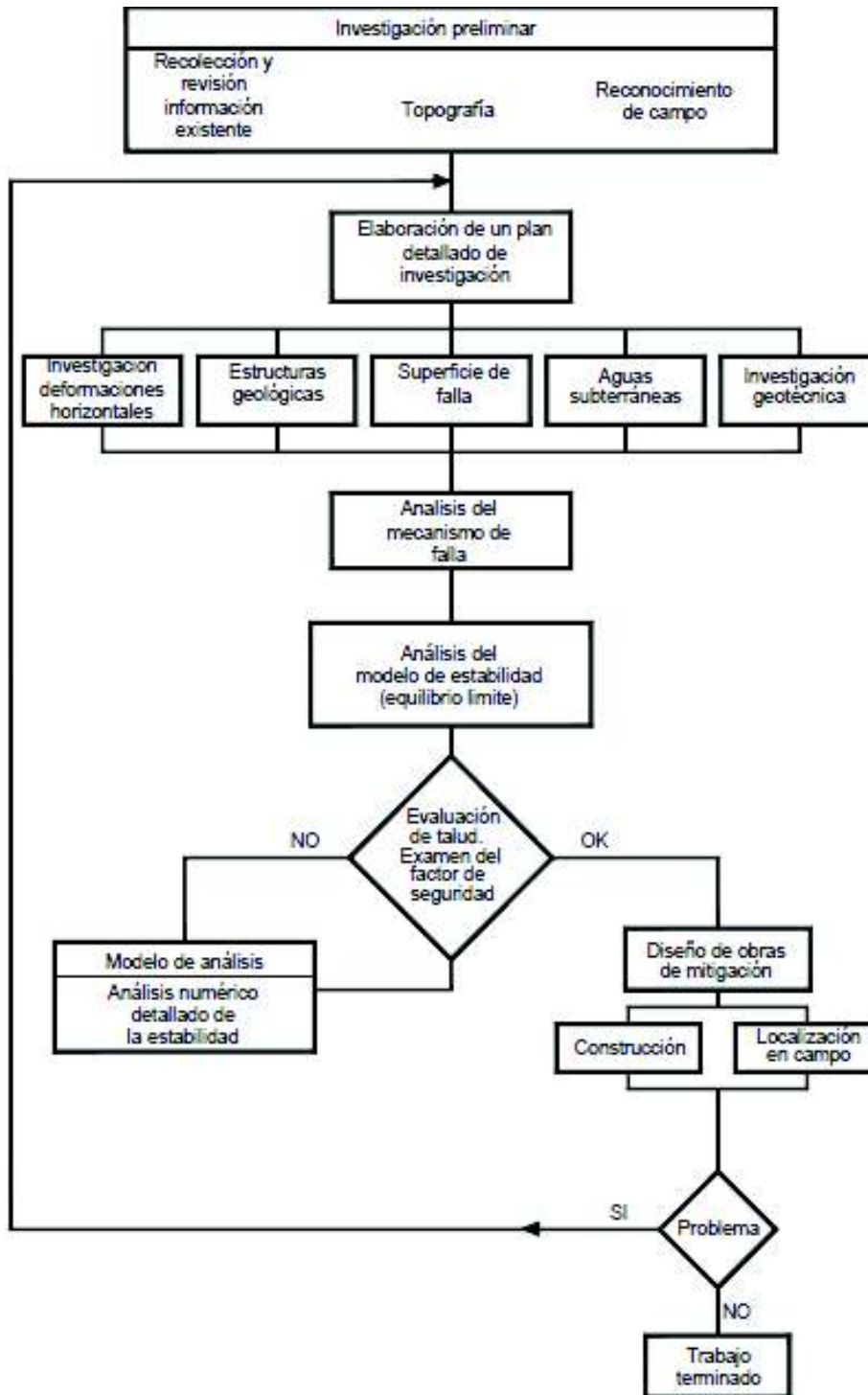


Figura 3.1 Diagrama de flujo para la investigación y análisis de deslizamientos. Modificado de Japan Landslide Society, 1996 (Suarez, J., 2009).

### 3.2 Métodos de equilibrio límite

Corresponde a los métodos más utilizados para el análisis de taludes; consisten en analizar las fuerzas estabilizadoras y fuerzas desestabilizadoras de un talud a lo largo de una superficie de rotura. Se basan en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Mohr – Coulomb.
- La definición de coeficiente de seguridad.

Se asumen las siguientes condiciones:

- La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos como: peso específico del material, presión de agua, etc.
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

Los métodos de equilibrio límite se clasifican en:

Métodos que consideran el análisis del bloque o masa total: son válidos para materiales homogéneos y realizan únicamente el cómputo y la comparación de fuerzas en un punto de la superficie de rotura. (González de Vallejo, L., et al, 2002).

Métodos que consideran la masa dividida en rebanadas o fajas verticales: son válidos para materiales no homogéneos, y toman en cuenta hipótesis propias sobre la localización, posición y distribución de las fuerzas que actúan sobre cada faja vertical. El cálculo de las fuerzas se hace para cada una de las fajas verticales en las que se ha dividido el talud, y finalmente se integran los resultados como uno solo. (González de Vallejo, L., et al, 2002).

### 3.3 Análisis de estabilidad

Para el diseño de taludes es necesario elegir un factor de seguridad que se acople a la finalidad y condiciones de la obra, como son: los costos de ejecución, riesgos que podría causar la rotura del talud, grupos afectados, etc. Para taludes permanentes es necesario trabajar con un factor de seguridad de entre 2 y 1.5 dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos. Según la Norma Ecuatoriana de Construcción, NEC 2014, se debe trabajar con los siguientes factores de seguridad puestos en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Tomado de la NEC. Factores de seguridad por corte mínimos.

Condición	FS Corte Mínimo	
	Diseño	Construcción
Carga muerta + carga viva nominal	1.5	1.25
Carga muerta + carga viva máxima	1.25	1.1
Carga muerta + carga viva nominal + sismo de diseño pseudo estático	1.1	1.00*
Taludes – condición estática y agua subterránea normal	1.5	1.25
Taludes - condición psudo estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño	1.05	1.00*

\* La demanda sísmica para los análisis pseudo estáticos será del 60% de la aceleración máxima en el terreno.



Los estudios continúan con un análisis posterior, que se realiza a partir de la existencia de un deslizamiento, lo cual facilita la descripción del talud conociendo el mecanismo, modelo y geometría de la inestabilidad, las características geomecánicas de los materiales involucrados (cohesión y ángulo de fricción interna), resumizados en lo que se denomina retroanálisis.

Los métodos de análisis de estabilidad consisten en un planteamiento físico – matemático que combinado con el análisis de las fuerzas que actúan sobre un talud, fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras, permiten describir al talud; los métodos de análisis de estabilidad se clasifican en dos:

**Métodos determinísticos:** a partir de condiciones conocidas o supuestas de un talud, se analiza su estabilidad. ‘Consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para que a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud.’ (González de Vallejo, L., et al, 2002).

Existen dos grupos: métodos de equilibrio límite y métodos de tenso-deformacionales.

**Métodos probabilísticos:** a partir de condiciones determinadas se considera la probabilidad de rotura del talud. ‘Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como variables aleatorias en los análisis (lo que supone su mayor dificultad por la gran cantidad de datos necesarios, dadas las incertidumbres sobre las propiedades de los materiales), realizándose a partir de ellas los cálculos del factor de seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del factor de seguridad, y curvas de estabilidad de talud, con el factor de seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.’ (González de Vallejo, L., et al, 2002).

### **3.4 Levantamiento del inventario de FRM**

El reconocimiento e identificación del área de trabajo es una etapa de gran ayuda, en el sentido de que, a partir de esta primera observación, se puede generar una teoría de lo que sucede en el talud, hacer observaciones de los problemas principales, hacer las respectivas anotaciones para continuar con la siguiente etapa, el análisis de la información existente.

La recolección de información de estudios anteriores facilita el entendimiento de la dinámica del lugar, además de evitarnos realizar actividades que han sido realizadas con anterioridad y que más bien representan un apoyo para la investigación.

La zona de estudio cuenta con información perteneciente a Hidroequinoccio – EP, quienes facilitaron mapas topográficos como además informes geológicos de la zona; dicha información se complementó con trabajos de investigación de la EPN.

Con el estudio de los mapas geológicos se puede obtener los parámetros geotécnicos básicos de una región, ya que la presencia de un deslizamiento está relacionada con la ocurrencia de una serie de eventos geológicos.

Mientras que con el estudio de los mapas topográficos se puede obtener información respecto a las pendientes, accidentes, sistemas de drenaje y geomorfología.

Después de realizar un análisis general de la información existente y de definir con claridad el área de interés es necesario una visita de campo, la cual permite tener una

mejor apreciación local, genera una visión tridimensional de los eventos y permite obtener gran cantidad de datos.

Durante la visita de campo es necesario inspeccionar los taludes afectados o los taludes que requieren ser analizados, realizar la clasificación y tipo de movimiento, determinar los sistemas de agrietamientos, tipo de suelo, fuentes de agua y examinar las regiones adyacentes que pueden contribuir a las causas de los movimientos (Fotografía 3.1). Además, se recomienda registrar los patrones regionales y locales de la topografía para localizar elementos importantes, como cambios bruscos de pendiente, tipo de vegetación, usos de la tierra y otras actividades de los sitios aledaños. Para finalizar la toma de datos es necesario realizar un perfil o sección del movimiento, y tomar varias fotografías del sitio.



Fotografía 3.1 Caracterización y toma de datos de un talud afectado por un deslizamiento. (UTM, WGS 84: 757252E; 17661N).

Para la toma de datos y descripción del talud, se tomó como modelo el formato de inventario de remoción en masa realizado por (Carrera, S., Carlosama, F., 2017). (Figura 3.2)

Nombre del encuestador: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ Hora: \_\_\_\_\_

<b>UBICACIÓN</b> Localidad: _____ UTM: _____ X: _____ Y: _____ Altura: _____	<b>FECHA DE OCURRENCIA</b> Primer Movimiento: ____/____/____ Segundo Movimiento: ____/____/____ <b>ESTADO</b> <input type="checkbox"/> Activo <input type="checkbox"/> Inactivo	<b>TIPO DE MOVIMIENTO:</b> 1 <input type="checkbox"/> Caída 2 <input type="checkbox"/> Desliz. Rotacional <input type="checkbox"/> Propagación Lateral <input type="checkbox"/> Reptación <input type="checkbox"/> Flujo <input type="checkbox"/> Desliz. Translacional <input type="checkbox"/> Otros: _____ <small>Nota: 1=Primer Movimiento 2=Segundo Movimiento</small>	<b>DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA</b> (ver columna en la parte posterior) _____ _____ _____ _____ _____ _____																																																																																					
	<b>Nivel de Humedad</b> Seco <input type="checkbox"/> Húmedo <input type="checkbox"/> Muy Húmedo <input type="checkbox"/>	<b>CAUSAS DEL MOVIMIENTO:</b> <input type="checkbox"/> Material Plástico débil <input type="checkbox"/> Material desmenuzable <input type="checkbox"/> Material Meteorización <input type="checkbox"/> Material Fisurado, agrietado <input type="checkbox"/> Orientación desfavorable <input type="checkbox"/> Mantenimiento deficiente sist. drenaje <input type="checkbox"/> Sismo <input type="checkbox"/> Lintas <input type="checkbox"/> Erosión Superficial <input type="checkbox"/> Sacudación al pie del talud	<b>POBLACIÓN DAMNIFICADA:</b> _____ _____ _____	<b>Conversión para intensidad de daño:</b> DL: Daño leve. DM: Daño Moderado DS: Daño severo DT: Destrucción Total NC: No cuantificable.																																																																																				
<b>COBERTURA Y USO DE SUELO:</b> Tipos de cobertura: _____ Uso de suelo: _____	<b>DAÑOS:</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">INF</th> <th rowspan="2">AE</th> <th rowspan="2">DA</th> <th rowspan="2">Tipo</th> <th colspan="5">Intensidad y cantidad</th> <th rowspan="2">Observaciones</th> </tr> <tr> <th>DL</th> <th>DM</th> <th>DS</th> <th>DT</th> <th>NC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	INF	AE	DA	Tipo	Intensidad y cantidad					Observaciones	DL	DM	DS	DT	NC																																																																							<b>Vegetación Herbácea:</b> <input type="checkbox"/> Vegetación Herbácea <input type="checkbox"/> Árboles <input type="checkbox"/> Matorrales <input type="checkbox"/> Cuerpo agua <input type="checkbox"/> Cultivos <input type="checkbox"/> Construcciones <input type="checkbox"/> Sin cobertura <input type="checkbox"/> Otros: _____	<b>Uso de suelo:</b> <input type="checkbox"/> Ganadería <input type="checkbox"/> Área protegida <input type="checkbox"/> Agrícola <input type="checkbox"/> Recreación <input type="checkbox"/> Zona Industrial <input type="checkbox"/> Viviendas <input type="checkbox"/> Vías <input type="checkbox"/> Otros: _____
INF	AE					DA	Tipo	Intensidad y cantidad					Observaciones																																																																											
		DL	DM	DS	DT			NC																																																																																

<b>EFFECTOS SECUNDARIOS:</b> (Especificar daños a infraestructura, casas, vías, etc.) _____ _____ _____ _____		<b>COLUMNA</b> 
<b>ESQUEMA DEL MOVIMIENTO.</b>		
<b>PLANTA</b> 	<b>PERFIL</b> 	
<b>OBSERVACIONES:</b> _____ _____ _____		

Figura 3.2 Formato para inventario de Fenómenos de Remoción en Masa (Carrera, S., Carlosama, F., 2017).

### 3.5 Descripción Litoestratigráfica

Para cada uno de los sitios estudiados, junto a la descripción del fenómeno de remoción en masa ocurrido, se ha realizado la descripción e inventario de los materiales que los conforman y que facilitan el estudio geológico.

En la tabla 3.2 se presentan los sitios encontrados inestables con sus respectivas ubicaciones geográficas y según el abscisado del proyecto, así como una indicación

breve de los materiales que prevalecen en la inestabilidad del sitio. Algunos sitios presentan varios eventos de activación de deslizamiento.

Tabla 3.2 Ubicación de los deslizamientos a lo largo del canal de conducción de agua.

<b>Id</b>	<b>Abscisa</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>Material inestable</b>
Dd01	0+535	757444	17596	arcillas
Dd02	0+730	757252	17661	arenas
Dd03	2+090	757243	18764	arcillas
D01	1+126	757095	17830	suelos negros
D02	1+180	757106	17987	suelos negros
D03	1+430	757017	18195	suelos negros
D04	1+510	757038	18273	suelos negros
D05	1+680	757079	18441	suelos negros
D06	2+460	757050	19050	suelos negros
D07	2+610	757151	19103	arenas
D08	2+960	757079	19426	suelos negros
D09	3+290	757084	19736	suelos negros
D10	Cm	756742	20178	suelos negros
D11	0+150	757742	17383	arenas
D12	1+710	757083	18442	arenas, arcillas
D13	2+170	757178	18793	arcillas
D14	1+896	757203	18579	arcillas
D15	1+950	757224	18627	arcillas
D16	0+340	757594	17436	arenas
Dd04	0+630	757332	17636	Aluvial, arcillas

### 3.6 Características Geotécnicas

Una vez identificados las características del lugar, fue necesario identificar y caracterizar los materiales que tienen tendencia a ser más débiles, localizar los niveles de agua que puedan estar afectando la estabilidad del terreno, y de estos lugares realizar su respectivo muestreo.

La actividad de recolección de muestras, se lo hizo con ayuda de tubos Shelby (muestra inalterada); así se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas a las cuales se les aplicó los procesos correspondientes para su transporte y posterior análisis en el laboratorio (Fotografía 3.2).

Se tomaron un total de 17 muestras de las cuales se realizaron, 17 ensayos de corte directo, 10 ensayos S.U.C.S (granulometría por tamizado seco y límites de Atterberg).



Fotografía 3.2 Toma de muestra con tubo Shelby. (UTM, WGS 84: 757444E; 17596N).

## 3.7 Investigación de laboratorio

### 3.7.1 Ensayo de Corte Directo

El ensayo de corte directo se lo realizó a 17 muestras correspondientes a suelos que generaban problemas en los taludes. Esta prueba se hizo con el fin de determinar la cohesión  $c$  y ángulo de fricción del suelo  $\phi$ , y así realizar una clasificación geotécnica de los materiales por sus características. (Fotografía 3.3).

Durante el ensayo de corte directo, la muestra inalterada es sometida a una fuerza tangencial  $\tau$  y a una carga normal  $P$ . Se van observando los diferentes valores correspondientes a los esfuerzos de corte máximo en rotura  $\tau$  y con estos valores se grafica la línea envolvente de rotura o falla que correspondería a la tangente común a los círculos de Mohr, y que dará como resultado la cohesión  $c$ , ordenada en el origen, y el ángulo de fricción interna  $\phi$  como la pendiente de la línea (figura 3.3). Durante la prueba del laboratorio se realiza tres ensayos con diferentes cargas para la misma muestra, al final se obtiene una gráfica donde se muestra el comportamiento del suelo (deformación lateral) al ser sometido a diferentes esfuerzos de corte. En el eje de las abscisas se grafica la deformación lateral y en el eje de las ordenadas el esfuerzo cortante (figura 3.4).



Fotografía 3.3 Maquina con la que se realiza los ensayos de corte directo (figura de la izquierda). Preparación de las muestras para realizar ensayo de corte directo (figura de la derecha).

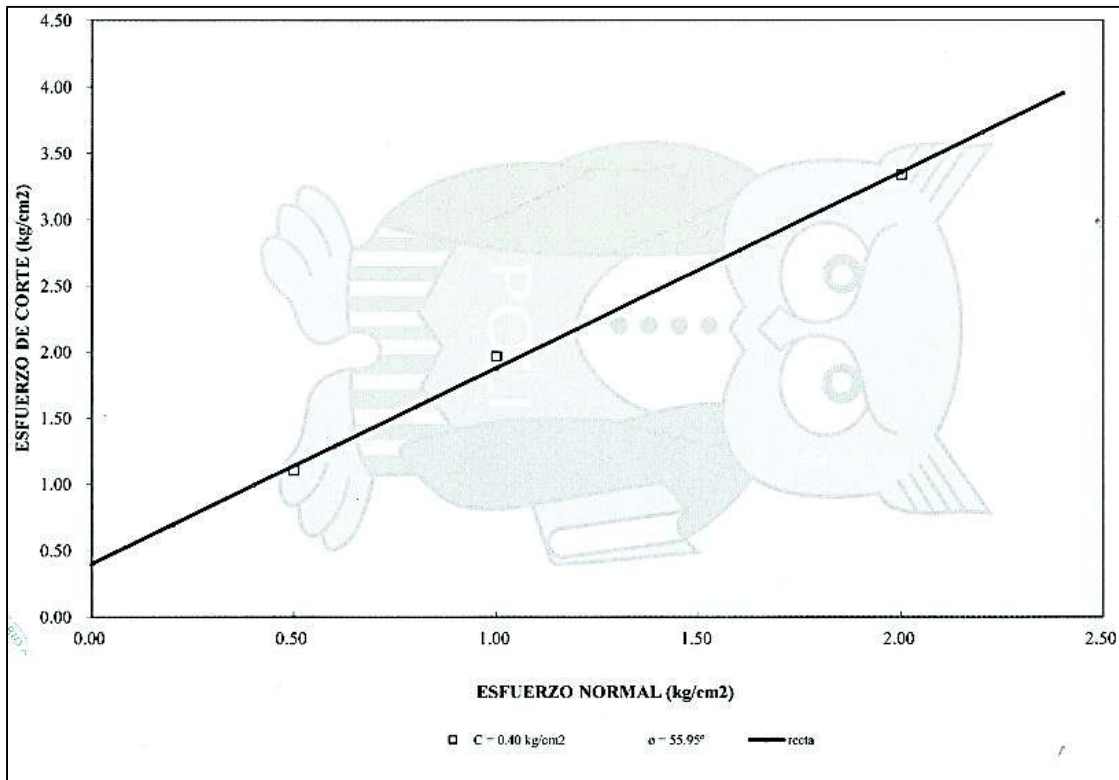


Figura 3.3 Gráfica resultante que contiene los valores de cohesión y ángulo de fricción de una muestra.

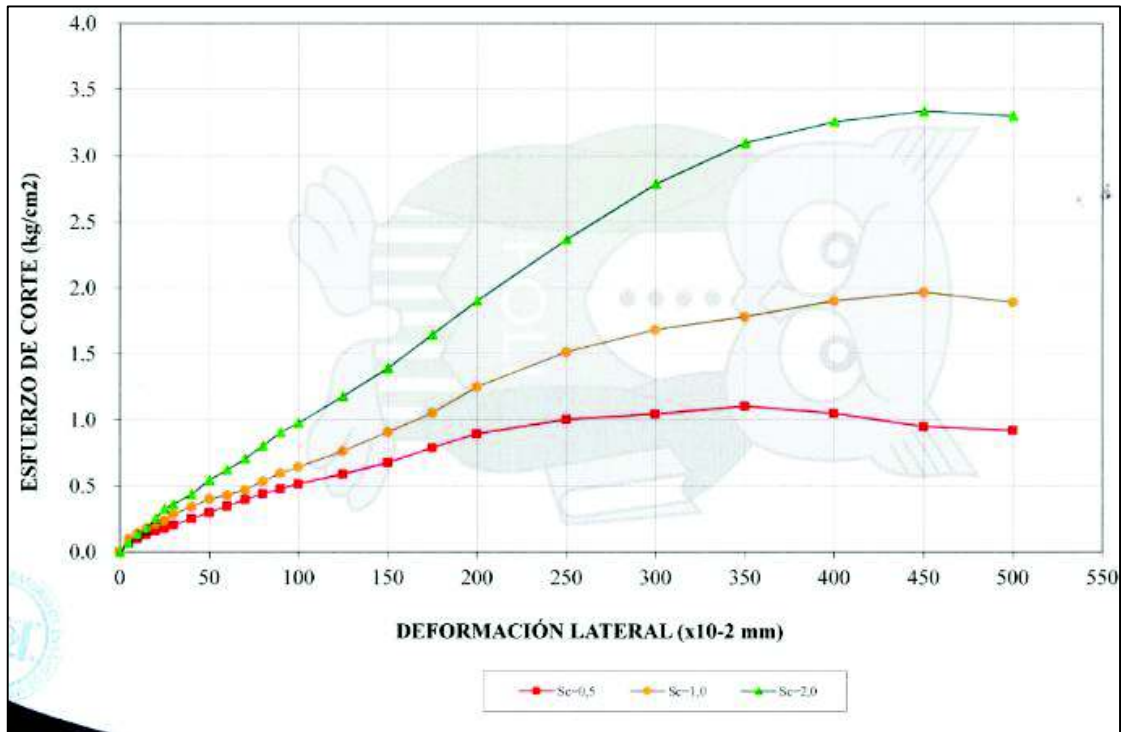


Figura 3.4 Gráfica esfuerzo cortante vs deformación lateral.

### 3.7.2 Ensayos para la Clasificación de Suelo tipo S.U.C.S

Para la clasificación de las muestras de suelo obtenido en el campo, se toma como referencia el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S), el cual se basa en diferentes parámetros como la granulometría; límite líquido, líquido plástico e índice de plasticidad.

#### Granulometría

El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en porcentaje de los diversos tamaños de partículas que constituyen el suelo. Para clasificar por tamaños las muestras, se empleó la técnica de tamizado en seco (Fotografía 3.4), que consiste en hacer vibrar mecánicamente la muestra de suelo y hacerla pasar por una serie de tamices ordenados de tal forma que desde la base se encuentran los de menor abertura de la malla y hacia la parte superior se encuentran los de mayor abertura, los tamices utilizados para el ensayo se muestran en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Numeración y orden de los tamices utilizados para la práctica del laboratorio.

Tamiz N°	Abertura (mm)
4	4.750
10	2.000
20	0.850
40	0.425
200	0.075



Fotografía 3.4 Tamices utilizados para los ensayos de laboratorio.

A continuación, se traza la curva de la composición granulométrica, donde el eje de las abscisas se encuentra en escala logarítmica y representa las aberturas de las mallas y el eje de las ordenadas, que se encuentra en escala aritmética, representa los porcentajes de material que pasa por dichas mallas. (Figura 3.5).

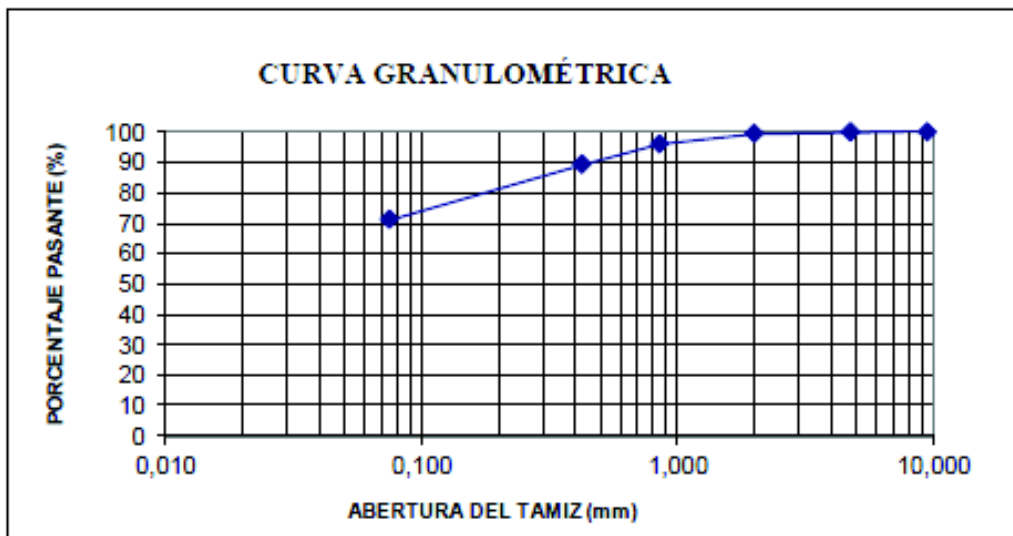


Figura 3.5 Curva granulométrica de uno de los ensayos realizados en el laboratorio.

La curva resultante se compara con las que se tengan como especificaciones para la graduación del material y la forma de la curva granulométrica da una idea de la composición granulométrica del suelo, es decir, si un suelo está formado por partículas de un mismo tamaño quedara representado como una línea vertical, caso contrario si el suelo está formado por diferentes tamaños de grano la curva será tendida.



## Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio que permiten determinar los rangos de humedad del suelo con los que mantiene su estado plástico. Para la realización de estos ensayos se requiere remoldear la muestra que incluye material de tamaño fino hasta material de tamaño de arena fina.

### Límite líquido

El límite líquido se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado plástico al líquido.

Los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia mínima al esfuerzo de corte; y una cohesión prácticamente nula.

Para realizar el ensayo, se tomó 100 gr de muestra de suelo, aproximadamente, se hace una mezcla pastosa y homogénea; con ayuda de la espátula se coloca la muestra dentro de la copa Casagrande, (figura 3.8), teniendo en cuenta que la parte alisada en la zona de mayor profundidad sea de 1 cm de espesor. Se realiza una división en dos partes con la ayuda de un ranurador, se debe hacer la división en un solo movimiento y de arriba hacia abajo; se acciona la copa a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes que produce que las dos partes antes divididas, se junten. Cuando se obtiene un número de golpes comprendido entre 6 y 35, se toma una parte de la muestra, se pesa y se seca con la ayuda de un horno. Se repite el ensayo al menos tres veces, con muestras que incluyan entre 25 y 35 golpes, otro entre 20 y 30 golpes, y finalmente otro ensayo que implique entre 15 y 25 golpes. Finalmente se realiza un ploteo de los puntos y una curva. (Fotografía 3.5).



Fotografía 3.5 Cuchara de Casagrande utilizada para realizar el ensayo de límite líquido. (figura de la izquierda). Porción de suelo tomada para realizar el ensayo (figura de la derecha).

## Límite Plástico

El límite plástico se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico.

Para la realización de este ensayo, generalmente se utiliza el sobrante de la muestra utilizada para realizar el ensayo de límite líquido; se forma una pequeña bola, de aproximadamente 1 cm de diámetro, e inmediatamente se lo amasa hasta formar cilindros de 3, 17 mm de diámetro. Cuando al amasarse los cilindros se produzcan grietas, se pesa y se seca la muestra. (Fotografía 3.6).



Fotografía 3.6 Cilindros resultantes del ensayo de límite plástico.

## 3.8 Modelación matemática utilizando software

### 3.8.1 Método de Bishop Simplificado

Este método fue propuesto por Bishop en 1955, y el cual es utilizado para casos donde la superficie de rotura es circular.

Según González de Vallejo et al. (2002), describe el proceso del cálculo de  $F$  (Factor de seguridad), de la siguiente forma: se divide a la masa deslizante en  $n$  rebanadas o fajas verticales. (Figura 3.6).

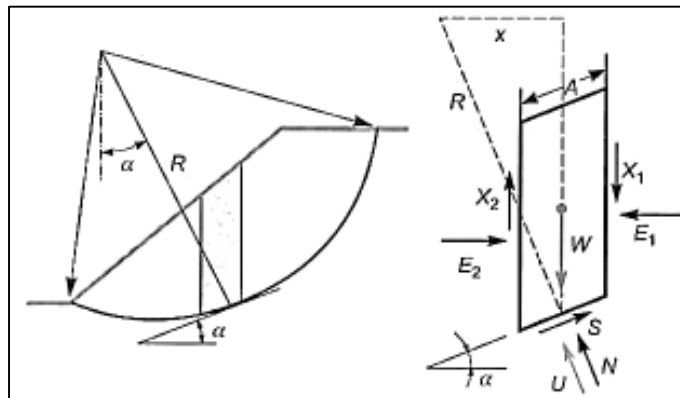


Figura 3.6 Análisis de estabilidad de taludes por el método de Bishop. Talud dividido en rebanadas o dovelas. Esquema de las fuerzas que actúan en una rebanada o dovela. Tomado de (González de Vallejo, L., et al, 2002).

Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo.

$$\sum S \cdot R = \sum W \cdot x = \sum W \cdot R \operatorname{sen} \alpha$$

Como:

$$F = (cA + N \tan \phi) / S$$

el valor de S es:

$$S = (cA + N \tan \phi) / F$$

luego:

$$\sum \frac{cA + N \tan \phi}{F} R = \sum (WR \operatorname{sen} \alpha)$$

$$F = \frac{\sum (cA + N \tan \phi)}{\sum (W \operatorname{sen} \alpha)}$$

Para despejar la incógnita  $N$  se establece el equilibrio vertical en la rebanada:

$$W + \Delta X = N \cos \alpha + U \cos \alpha + S \operatorname{sen} \alpha$$

Sustituyendo  $S$  y despejando  $N$  se obtiene:

$$N = \frac{W + \Delta X - U \cos \alpha - [(cA + N \tan \phi) / F] \operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha}$$

de donde:

$$N = \frac{W + \Delta X - [(cA \operatorname{sen} \alpha / F) + U \cos \alpha]}{\cos \alpha + [(\tan \phi \operatorname{sen} \alpha) / F]}$$

Y el coeficiente de seguridad queda (considerando  $\Delta X = 0$ ):

$$F = \frac{\sum [cA \cos \alpha + (W - U \cos \alpha) \tan \phi] [1 / Mi(\alpha)]}{\sum W \operatorname{sen} \alpha}$$

Donde:

$$Mi(\alpha) = \cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F} \right)$$

Dado que  $F$  no aparece en esta expresión de forma explícita es necesario realizar varias iteraciones para obtener su valor, aunque la convergencia suele ser muy rápida.

Una vez obtenido el coeficiente de seguridad  $F$  de la superficie considerada, se toma otra superficie circular y se determina el nuevo valor de  $F$ , y así sucesivamente hasta encontrar el que proporcione el valor de  $F$  mínimo.

### 3.8.2 Método de Spencer

Este método fue propuesto por Spencer en 1967 y se basa en el supuesto de que las fuerzas laterales a lo largo de las superficies de división de cada rebanada son paralelas, es decir que tienen el mismo ángulo de inclinación, pero este ángulo es desconocido. Este método satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos y es aplicable para cualquier forma de la superficie de falla. (Catanzariti, F. 2016).

Catanzariti, F. (2016) describe la aplicación del método tomando en cuenta el equilibrio de momentos respecto al centro del arco descrito por la superficie de deslizamiento de la siguiente como se muestra en la figura 3.7:

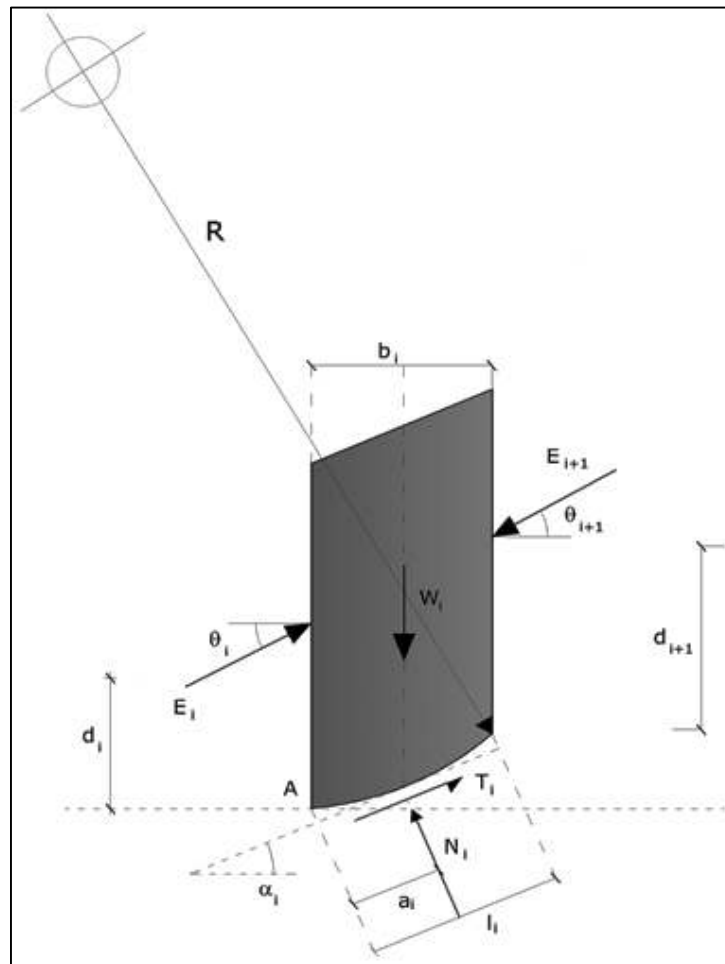


Figura 3.7 Análisis de estabilidad de taludes por el método de Spencer. Diagrama de fuerzas y momentos. Tomado de (Catanzariti, F. 2016).

$$1) \sum Q_i \cdot R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

donde:

$Q_i=0$ : fuerza de interacción entre las rebanadas

R: radio del arco circular

$\theta$ : ángulo de inclinación de la fuerza  $Q_i$  respecto a la horizontal.

Imponiendo el equilibrio de las fuerzas horizontales y verticales se obtiene respectivamente:

$$\sum Q_i \cdot \cos\theta = 0$$

$$\sum Q_i \cdot \sen\theta = 0$$

Asumiendo las fuerzas  $Q_i$  paralelas entre sí, se puede escribir también:

$$2) \sum Q_i = 0$$

$$Q_i = \frac{c/F_s \cdot (W \cdot \cos\alpha - \gamma_n \cdot h \cdot l \cdot \sec\alpha) \cdot \tan\alpha/F_s - W \sen\alpha}{\{\cos(\alpha - \theta) \cdot [F_s + \tan\varphi \cdot \frac{\tan(\alpha - \theta)}{F_s}]\}}$$

Se propone el cálculo de dos factores de seguridad; el primero ( $F_{sm}$ ) se obtiene a partir del equilibrio de momentos (ecuación 1); y el segundo factor de seguridad se obtiene a partir del equilibrio de fuerzas (ecuación 2).

En la práctica se procede resolviendo la ecuación 1 y ecuación 2 para un intervalo dado de valores del ángulo  $\theta$ , considerando como valor único del factor de seguridad aquel para el cual se obtiene:

$$F_{sm} = F_{sf}$$

### 3.8.3 Método de Janbú

Este método fue propuesto por Janbú en 1967 y considera que las superficies de rotura no deben ser necesariamente circulares; y principalmente considera que las fuerzas entre las dovelas son solo horizontales, no tomando en cuenta las fuerzas cortantes. Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección  $f_o$ , (figura 3.8), el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura. (Sanhueza, P. C., et al. 2013). Para determinar la estabilidad de un talud, Janbú considera el cálculo de un FS, el cual satisface el equilibrio de esfuerzos.

$$F = \frac{f_o \cdot [c \cdot b + W \tan\theta] \cdot \frac{1}{\cos\alpha \cdot m \cdot \alpha}}{\sum W \tan\alpha}$$

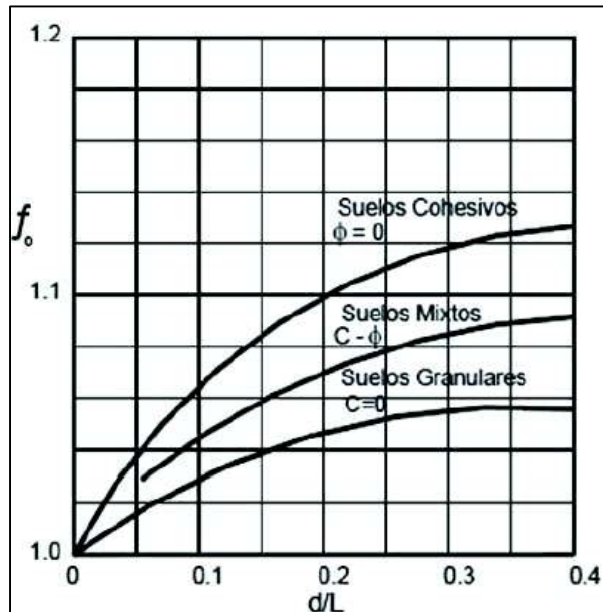


Figura 3.8 Análisis de estabilidad de taludes por el método de Janbú. Diagrama del factor  $f_0$  utilizado en el método de Janbú. Tomado de (Sanhueza, P. C., et al. 2013).

### 3.9 Geoestadística

Para generar los mapas de propiedades geotécnicas y de susceptibilidad, se realizó un análisis geoestadístico con el Software ArcGIS 10.4.1, utilizando el método de interpolación *Kriging*. Las interpolaciones realizadas fueron aplicadas a los resultados de los ensayos S.U.C.S., ángulo de fricción interna y cohesión. Se partió del análisis de histogramas, figura 3.9, para determinar la transformación adecuada que produzca una menor diferencia entre la mediana y la media. A continuación, se procede con un análisis de tendencia de las gráficas de los datos, figura 3.10, lo que permite determinar su naturaleza, dato que será importante para realizar el proceso de *Kriging*.

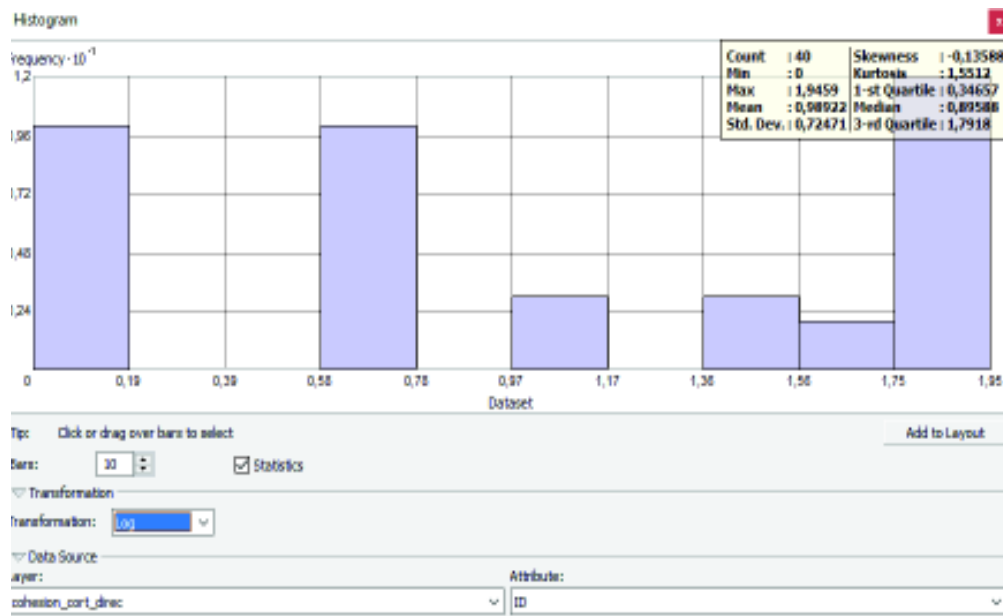


Figura 3.9 Histograma para el análisis de datos.

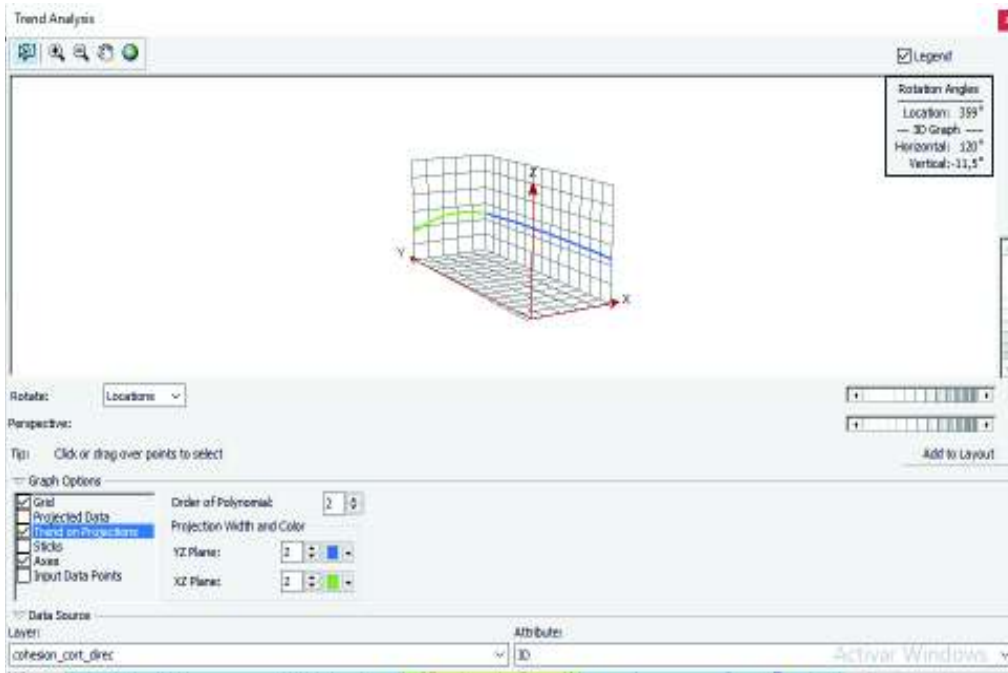


Figura 3.10 Análisis de tendencia de las gráficas.

Una vez determinado el tipo de transformación y la tendencia de las gráficas, que para el presente estudio resultaron en transformación logarítmica y tendencia exponencial, se procede a ejecutar la herramienta *Geostatistical wizard*, que nos permite tomar la opción de *Kriging* ordinario y hacer el análisis del semivariograma. (Figura 3.11). A partir de la interpolación realizada se generan los mapas de propiedades geotécnicas y de susceptibilidad.

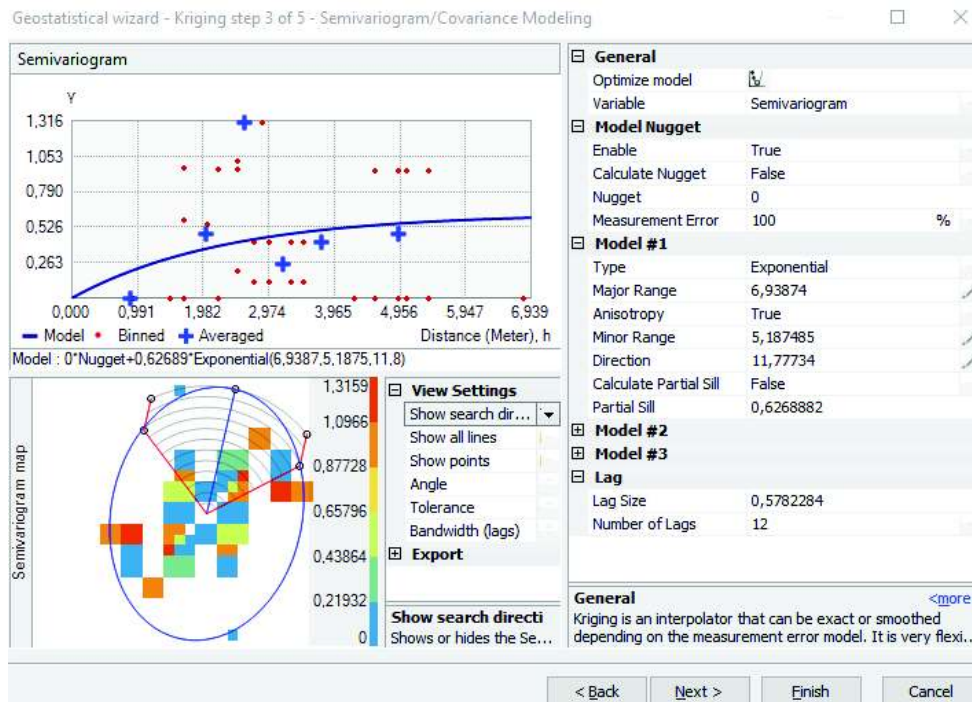


Figura 3.11 Análisis de datos con kriging ordinario.

### 3.10 Uso del software SLIDE 5.014 en el análisis de estabilidad de taludes

El uso de softwares para la evaluación de estabilidad en taludes ha facilitado el cálculo del factor de seguridad. Existen diferentes tipos de programas, para este estudio en particular se utilizó el software Slide 5.014 desarrollado por Rocscience, y que dentro de las ventajas que ofrece está el hecho de que permite analizar la estabilidad del talud bajo diferentes métodos como son Bishop, Janbú, Spencer, GLE, Morgenstern – Price, entre otros; se puede trabajar con superficies de rotura circulares y no circulares; puede agregarse múltiples capas de materiales, niveles freáticos y piezométricos; permite simular condiciones de reforzamiento; entre otras cosas.

Los valores geotécnicos obtenidos de los materiales muestreados, son ingresados en el software (Figura 3.12), donde se agregan además los diferentes niveles freáticos, para finalmente hacer correr el programa y obtener las modelaciones con los métodos escogidos.

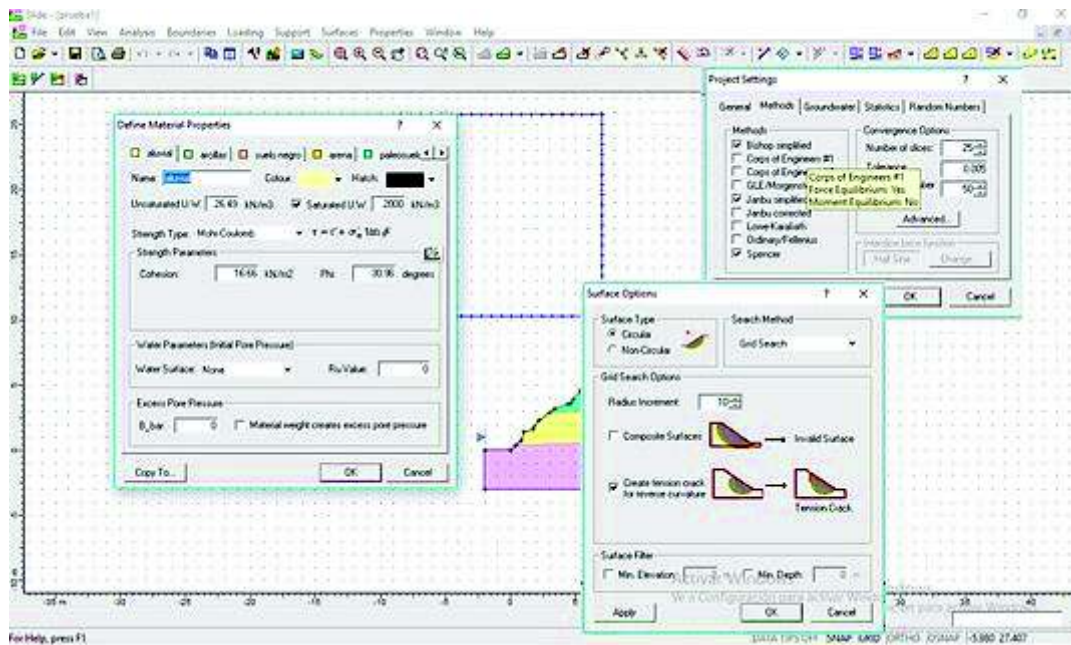


Figura 3.12 Interfaz del Software Slide 5.014. al ingresar los datos de un talud.

El comportamiento de los materiales es modelado bajo el criterio de Mohr-Coulomb y las condiciones sísmicas son en base a las aceleraciones máximas registradas en cada zona.

Una vez ingresados todos los datos correspondientes al talud, el programa entrega todas las posibles superficies de rotura, haciendo énfasis en la superficie de falla menos favorable. (Figura 3.13).



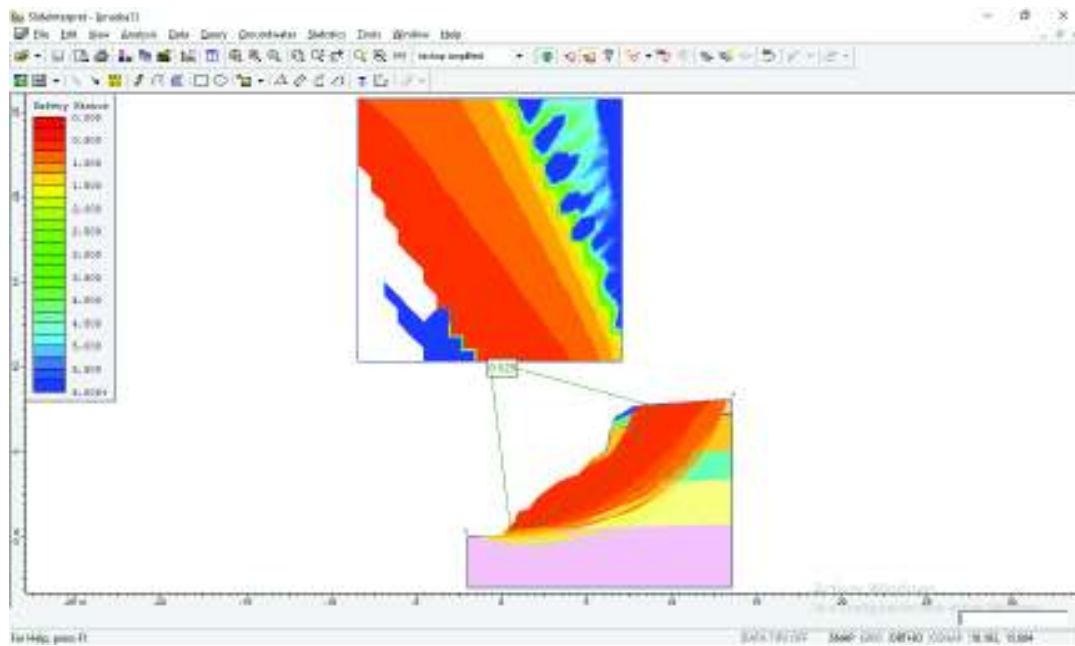


Figura 3.13 Interfaz del Software Slide 5.014. con las diferentes superficies de rotura posibles.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS

#### 4.1 Inventario de los fenómenos de remoción en masa

Con el trabajo de campo y los datos recogidos, se construyó un inventario de fenómenos de remoción en masa, el cual consta de 20 FRM: 14 deslizamientos rotacionales, 4 deslizamiento traslacional y 2 caídas de bloques como movimientos primarios; ligados a ellos movimientos del tipo deslizamiento rotacional, traslacional y de caída como movimientos secundarios. Los fenómenos de remoción en masa fueron representados con la ayuda de un software GIS (Figura 4.1), y sus características sintetizadas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Inventario de FRM ocurridos a lo largo del canal de conducción de agua, junto con su ubicación, material inestable y otras características importantes.

Id	Abscisa	Coordenadas		Material Inestable	Tipo de Mov.		Estado	Humedad
		x	y		1	2		
Dd01	0+535	757444	17596	arcillas	Desliz. Traslación.	-	Activo	Muy húmedo
Dd02	0+730	757252	17661	arenas	Desliz. Rotacional	Caída	Activo	Húmedo
Dd03	2+090	757243	18764	arcillas	Desliz. Rotacional	.	Activo	Seco
D01	1+126	757095	17830	arenas	Desliz. Rotacional	-	Activo	Húmedo
D02	1+180	757106	17987	arenas	Desliz. Rotación.	-	Activo	Húmedo
D03	1+430	757017	18195	arenas	Desliz. Rotacional	-	Activo	Muy húmedo
D04	1+510	757038	18273	arenas	Desliz. Rotacional	-.	Activo	Húmedo
D05	1+680	757079	18441	arenas	Desliz. Rotacional	-	Activo	Húmedo
D06	2+460	757050	19050	arenas	Desliz. Traslación	-	Activo	Húmedo
D07	2+610	757151	19103	arenas	Desliz. Rotacional	-	Activo	Húmedo
D08	2+960	757079	19426	arenas	Desliz. Rotacional	-	Activo	Húmedo
D09	3+290	757084	19736	arenas	Desliz. Rotacional	-	Activo	Muy húmedo
D10	Cm	756742	20178	arenas	Desliz. Traslacional	-	Activo	Seco
D11	0+150	757742	17383	arenas	Desliz. Traslacional	-	Activo	Húmedo
D12	1+710	757083	18442	arenas	Desliz. Rotacional.	.	Activo	Muy húmedo
D13	2+170	757178	18793	arcillas	Caída	Desliz. Rotacional	Activo	Muy húmedo
D14	1+896	757203	18579	arcillas	Desliz. rotacional	-	Activo	Húmedo
D15	1+950	757224	18627	arcillas	Caída	Desliz. Rotación.	Activo	Húmedo
D16	0+340	757594	17436	arenas	Desliz. Traslación.	Caída	Inactivo	Húmedo
Dd04	0+630	757332	17636	Aluvial, arcillas	Desliz. Rotacional.	-	Inactivo	Húmedo

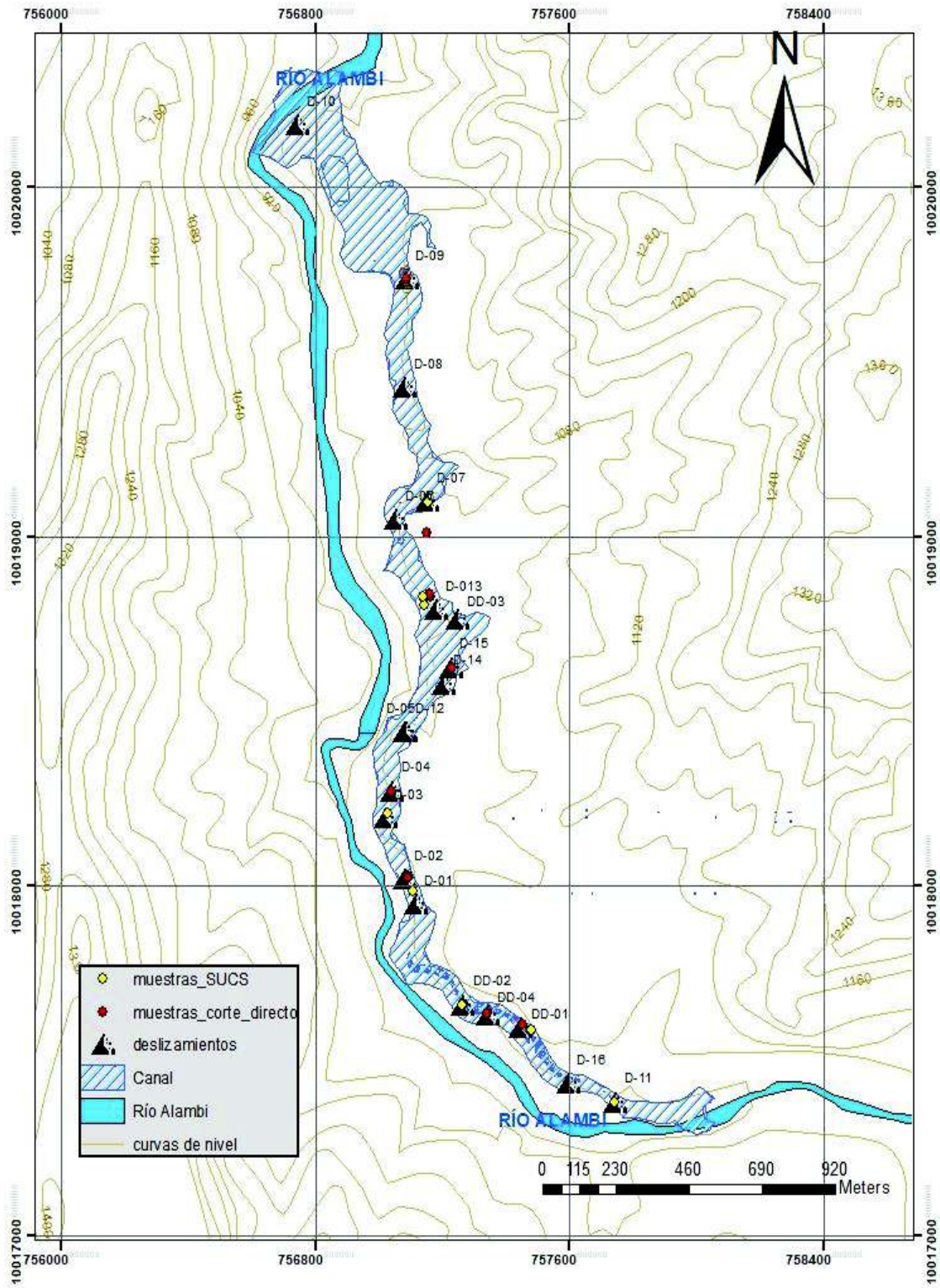


Figura 4.1 Mapa de ubicación de los 20 deslizamientos a lo largo del canal.

## 4.2 Características Geotécnicas

Las pruebas realizadas para el presente estudio se encuentran en la sección anexos; los resultados junto con el análisis de resultados se muestran a continuación:

### 4.2.1 Ensayos para Clasificación S.U.C.S.

Dentro del área de estudio, de un total de 10 muestras, 6 muestras registraron granulometrías que pasaron el tamiz N°200, es decir suelos finos. Este tipo de suelos está compuesto por suelos tipo ML (40%) (limos, arenas finas con componentes arcillosos de baja plasticidad) y suelos tipo MH (20%) (limos, arenas finas con componentes arcillosos de alta plasticidad). El restante de las muestras corresponde a suelos tipo SM (40%) (arena limosa) que pertenece a suelos gruesos. (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Resultados obtenidos del ensayo de la Clasificación S.U.C.S

Nombre	Coordenadas	Abscisa	Material	Partículas Gruesas (%)	Partículas Finas (%)	Tipo	
SS-003	757742/17383	0+150	Arenas	47.1	52.9	ML	Limo arenoso
SS-006	757457/17602	0+535	Arcillas	37.9	62.1	ML	Limo arenoso
SS-013b	757273/17668	0+735	Arenas	70.6	29.4	SM	Arena arcillosa
SS-013a	757124/17954	1+180	Arenas	68.2	31.8	SM	Arena arcillosa
SS-015	757041/18272	1+510	Paleosuelo	54.5	45.5	SM	Arena arcillosa
SS-026	757140/18805	2+194	Suelo negro	40.8	59.2	ML	Limo arenoso
SS-024a	757136/18826	2+214	Arcillas	34	66	MH	Limo arenoso con alta plasticidad
ss-024b	757248/18624	2+214	Arcillas	28.8	71.2	MH	Limo arenoso con alta plasticidad
ss-007a	757153/19100	2+610	Paleosuelo	47.1	52.9	ML	Limo arenoso
ss-007b	757154/19097	2+610	Arenas	45.2	54.8	SM	Arena arcillosa

Una vez obtenida la clasificación, los resultados fueron ploteados a lo largo de la zona de interés generando así el mapa de clasificación de suelos, utilizando la metodología de interpolación explicada en la sección 3.9.

Con la obtención del mapa se puede observar que la distribución de los materiales está marcada por un fuerte predominio de los materiales del tipo ML, los cuales a su vez se encuentran concentrados en la parte oriental del mapa; de igual manera se puede observar que los materiales que le siguen en orden de abundancia son los del tipo MH, los cuales se encuentran concentrados en mayor parte cerca del canal y del río Alambi. Finalmente se puede observar como los materiales tipo SM solamente aparecen cercanos al canal de agua y en menor concentración. (Figura 4.2).

Las zonas de inestabilidad se presentan en todos los tipos de suelo.

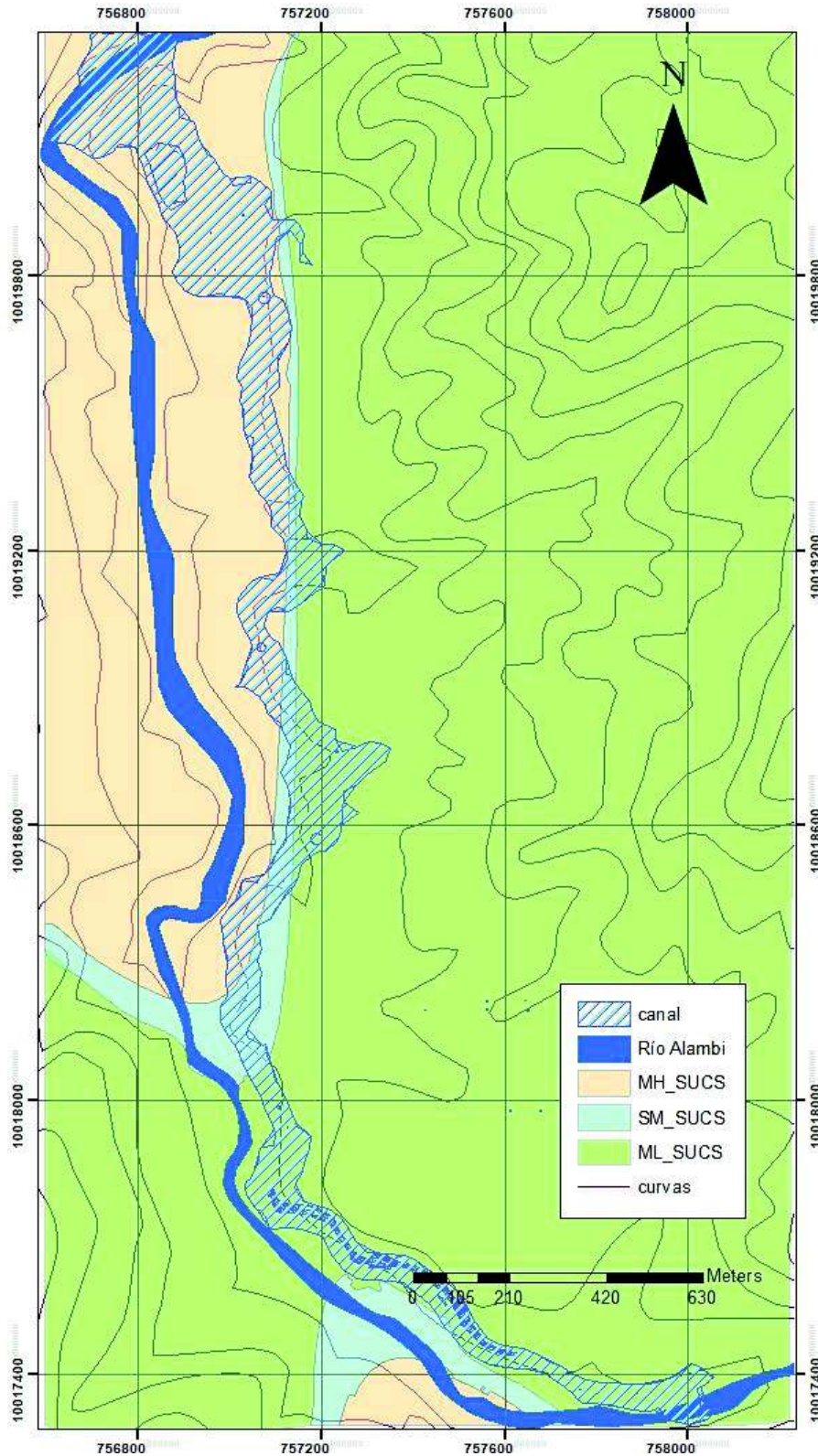


Figura 4.2 Mapa de clasificación S.U.C.S.

#### 4.2.2 Ensayos Límites de Atterberg

El mismo número de muestras utilizadas para el ensayo de S.U.C.S. fue utilizado para el análisis de Límites de Atterberg en suelos cohesivos (tabla 4.3), los cuales en promedio generaron un valor de 44.8% de contenido de humedad ( $w$ ), 38.05% de límite plástico (LP) y 47.98% de límite líquido (LL).

Tabla 4.3 Resultados obtenidos del ensayo de Límites de Atterberg.

Nombre	Coordenadas	Abscisa	Material	w (%)	LP(%)	LL(%)	IP(%)	IL(%)
SS-003	757742/17383	0+150	Arenas	19,30	NP	NP	NP	NP
SS-006	757457/17602	0+535	Arcillas claras	39,40	31,90	48,80	16,80	0,44
SS-013b	757273/17668	0+735	Arenas	26,70	NP	NP	NP	NP
SS-013a	757124/17954	1+180	Arenas	23,60	NP	NP	NP	NP
SS-015	757041/18272	1+510	Paleosuelo	25,30	21,80	22,80	1,00	0.35
SS-026	757140/18805	2+194	Suelo negro	37,40	28,30	40,20	11,80	0,77
SS-024a	757136/18826	2+214	Arcillas	78,30	67,80	73,30	5,40	1.94
ss-024b	757248/18624	2+214	Arcillas	45,70	40,40	55,70	15,30	0,34
ss-007a	757153/19100	2+610	Paleosuelo	43,20	38,1	47,1	9,1	0,56
ss-007b	757154/19097	2+610	Arenas	15,50	NP	NP	NP	NP

\*NP no posee.

Con los ensayos de clasificación granulométrica y la obtención de límites de Atterberg se puede determinar que la mayoría de suelos son del tipo cohesivo.

Haciendo un análisis más detallado a partir de los límites de Atterberg, se puede obtener el índice de plasticidad (IP), parámetro que representa el intervalo de humedades desde el estado semisólido a semilíquido (tabla 4.3). Tomando en cuenta el valor más bajo de IP (5,4%) se interpreta que el suelo requiere de poca cantidad de humedad para que pase del estado semisólido al estado líquido. De igual manera para el valor más alto de IP 16,8%, se interpreta que el suelo requiere de mayor cantidad de agua para pasar del estado semisólido a un estado líquido. el valor promedio de IP de las muestras cohesivas, 9.9%, se puede determinar que es un valor bajo, es decir que las muestras en general requieren de poca cantidad de agua para pasar a una condición líquida.

Dentro de la tabla 4.3 el valor de IP más bajo corresponde a la muestra SS-015, sin embargo, no se la toma en cuenta ya que esta muestra en la clasificación SUCS se ubica en el rango de SM, y este tipo de suelos no tienen plasticidad, por lo que se considera que hubo un error.

Otro parámetro que se analizó fue el índice de liquidez, que representa la consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural a partir de la siguiente formula:

$$IL = \frac{w - LP}{LL - LP}$$

Teniendo las siguientes condiciones: si  $IL < 0$ , el suelo se comporta como un sólido frágil; si  $0 < IL < 1$ , el suelo tendrá comportamiento plástico; y si  $IL > 1$ , el suelo tendrá comportamiento de líquido viscoso. (Suarez, 1998).

Los valores de IL fueron calculados para la Tabla 4.3, donde se puede apreciar una tendencia de los suelos a presentar un comportamiento plástico a excepción de la muestra SS-024a la cual presenta un comportamiento líquido viscoso, lo que estaría relacionado con la temporada de recolección de la muestra (invierno); sin embargo, el índice de liquidez promedio para las muestras es de un comportamiento plástico.

### 4.2.3 Ensayos de Corte Directo

En la Tabla 4.4 se presentan los valores de cohesión y ángulo de fricción interna obtenidos de los 17 ensayos de corte directo realizados a los diferentes materiales que componen los deslizamientos a lo largo del canal de conducción de agua de la hidroeléctrica.

Para el análisis de los valores de cohesión y ángulo de fricción obtenidos, se realizaron mapas, éstos tienen como fin caracterizar y definir las zonas de buenas y malas condiciones geotécnicas, es decir clasificar las zonas donde se encuentran los valores más altos y los valores más bajos de cohesión y ángulo de fricción interna que, junto con los parámetros como pendiente, litología y contenido de agua, determinaran la susceptibilidad del lugar.

Tabla 4.4 Parámetros obtenidos del ensayo de Corte Directo.

Nombre	Coordenadas	Abscisa	Material	Cohesión (Kg/cm <sup>2</sup> )	A. Fricción °
CD-003	757742/17383	0+150	Arena	0,29	41,02
CD-006	757452/17605	0+535	Arcillas	0,27	24,23
CD-011	757339/17637	0+630	Aluvial	0,90	27,02
CD-013b	757265/17665	0+730	Arenas	0,32	33,02
CD-012	757090/18026	1+180	Suelo negro	0,21	25,64
CD-013a	757089/18029	1+180	Arenas	0,15	30,11
CD-015	757039/18272	1+510	Paleosuelo	0,51	12,95
CD-017	757037/18272	1+510	Aluvial	0,84	32,21
CD-022	757229/18626	1+950	Aluvial	0,84	43,53
CD-023	757229/18625	1+950	Aluvial	0,70	46,40
CD-026	757140/18805	2+194	Suelo negro	0,10	25,17
CD-024a	757161/18829	2+214	Arcillas	1,27	34,22
CD-024b	757159/18836	2+214	Arcillas	1,44	34,99
CD-027	757085/19736	2+170	Aluvial	0,40	55,95
CD-007a	757153/19100	2+610	Paleosuelo	0,64	13,50
CD-007b	757154/19099	2+610	Arenas	0,45	25,17
CD-007c	757151/19012	2+610	Paleosuelo	0,15	31,80

Como se mencionó anteriormente los ensayos fueron realizados en los materiales que dentro de los deslizamientos se observaron que fallan, de esta manera se registran valores de cohesión que van desde 0,10 a 1,44 (Kg/cm<sup>2</sup>). Dentro del mapa (Figura 4.3) se observa un predominio de materiales de mediana a alta cohesión atravesando el canal de conducción de agua; de igual manera se puede observar que los materiales con cohesión más baja se encuentran distribuidos mayormente en la parte adyacente al canal.

Los valores de cohesión alta corresponden a las muestras obtenidas en los materiales de las matrices de los aluviales, los cuales contienen bloques que alcanzan tamaños métricos en algunos casos. Los valores de cohesión baja corresponden principalmente a los suelos orgánicos negros que generalmente son suelos agrícolas y a las arenas que se encuentran en el sector.

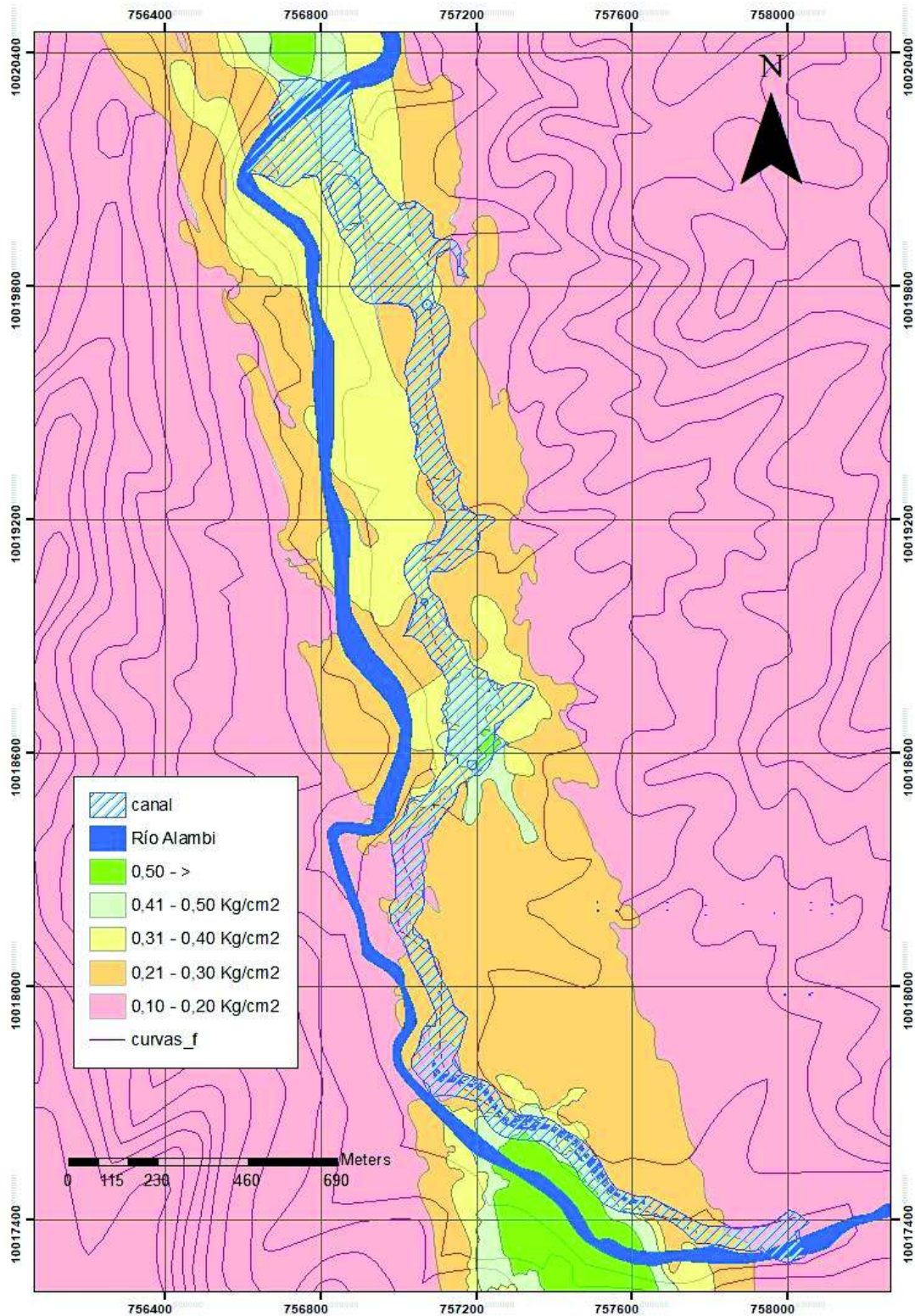


Figura 4.3 Mapa con los diferentes rangos de cohesión.



De similar manera, el análisis para el estudio del ángulo de fricción interno se realizó con el diseño de un mapa con los valores obtenidos en los ensayos de corte directo (Figura 4.4). A diferencia del mapa con los valores de cohesión, se puede observar que los materiales con mayor ángulo de fricción se encuentran en la parte adyacente del canal; y que el canal se encuentra atravesado por materiales con ángulo de fricción bajo y medio. Los valores de ángulos de fricción alta nuevamente están relacionados con el material de la matriz de los aluviales; mientras que los valores de ángulos de fricción baja están relacionados con los suelos negros.

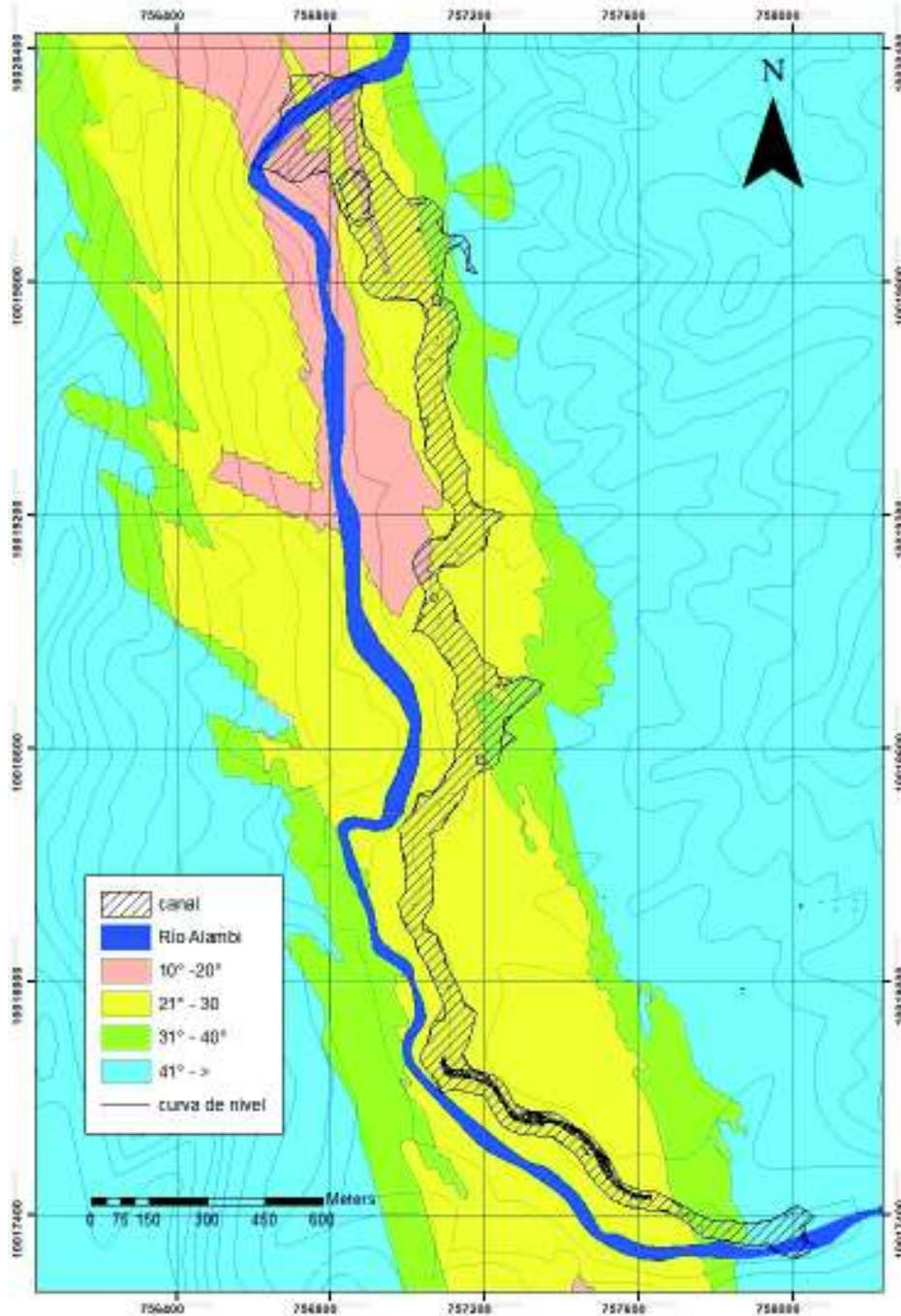


Figura 4.4 Mapa con los diferentes rangos de ángulo de fricción.

### 4.3 Unidades Geotécnicas

Dado que el actual estudio prescindió del estudio y tipificación de rocas, la clasificación de las unidades geotécnicas de los suelos se basó en función de las propiedades geomecánicas, distribución espacial obtenidas en campo y a través de los ensayos de laboratorio.

En general los suelos presentan características litológicas similares, las cuales no representan un significativo aporte para la clasificación geotécnica, por lo que la tipificación se la realizó a partir de los datos de ensayos S.U.C.S y corte directo.

Tabla 4.5 Parámetros obtenidos del ensayo de Corte Directo.

S.U.C.S	% I.P	% I.L	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción interna (°)	Inclinación de la pendiente (°)
SM	NP	NP	0.15 – 0.45	25 – 33	0 - 30
ML	9.1 – 16.8	0.44 – 0.77	0.10 - 0.90	25- 41	0 - 45
MH	5.4 – 15.3	0.34 - 1.94	1.27 - 1.44	34 - 35	0 - 45

\*NP: no posee.

La caracterización geotécnica se centra en los depósitos cuaternarios, donde a partir de los mapas de clasificación S.U.C.S (figura 4.2), ángulo de fricción (figura 4.3), cohesión (figura 4.4), y del mapa de pendientes (figura 4.5), junto con la tabla de las características geomecánicas (tabla 4.5), se obtienen 3 unidades geotécnicas.

#### 4.3.1 Unidad SM

Esta unidad está constituida por arenas bien clasificadas (ver anexos 4, 5, 6,10) que se encuentran distribuidas atravesando el canal de agua en forma de una fina franja, la cual tiene una concentración en la parte inicial del canal. Las arenas se encuentran generalmente sobreyaciendo materiales tipo arcilla e intercaladas en depósitos tipo aluvial que contienen clastos subredondeados de rocas ígneas. Desarrolla fuertes pendientes, casi verticales, que al estar en contacto con agua caen con facilidad. Tiene baja plasticidad, característica que también depende de la cantidad de materiales arcillosos que se encuentren asociados a las arenas. El ángulo de fricción interna varía entre 25° - 30° y 30° - 33°. Tiene valores de cohesión entre 0.15 y 0.45 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4.3.2 Unidad ML

Esta unidad está constituida principalmente por limos y arenas (ver anexos 1, 7, 8, 9). Esta unidad corresponde a la más extensa del área, ocupando mayormente la parte oriental y sur de la región. Los limos y arenas se encuentran intercaladas con materiales arcillosos y forman parte de aluviales. Forman pendientes poco abruptas, tiene media a alta plasticidad, el ángulo de fricción varía de 25° – 41°, y los valores de cohesión van entre 0.10 - 0.90 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4.3.3 Unidad MH

Esta unidad se encuentra formada por materiales finos, principalmente limos y arcillas de alta plasticidad (ver anexos 2, 3), las cuales generalmente se presentan limpias y sin intercalaciones, pero también forma parte de la matriz de algunos aluviales. Ocupa parte del noroccidente de la zona de estudio, formando fuertes pendientes, que en contacto con el agua fallan. Los valores del ángulo de fricción interna no presentan variaciones

importantes y tienen valores de  $34^{\circ}$  -  $35^{\circ}$ . La cohesión tiene valores entre 1.27 a 1.44  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

En las tres unidades descritas se presentan fenómenos de remoción en masa y las causas se describen a continuación.

## **4.4 Causas de los movimientos de FRM.**

### **4.4.1 Factores Preparatorios**

Son llamados así a los factores que reducen la estabilidad de un talud con el paso del tiempo pero que no causan movimiento. Corresponden a este grupo factores geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos.

#### **Litologías**

El área de estudio está cubierta por depósitos cuaternarios, de los cuales los coluviales presentan la mayor cantidad de deslizamientos.

Las litologías están compuestas por suelos finos y gruesos. Los primeros conforman la matriz de un suelo granular que ha sido transportado y también se encuentran dispuestos en forma de capas, están formados por limos y arcillas de plasticidad media a alta, permeabilidad baja a media y baja compactación, características que causan una pérdida de resistencia al corte del suelo. Los suelos gruesos corresponden a arenas arcillosas de permeabilidad media a alta, distinto grado de compactación lo que nuevamente causa una pérdida de resistencia al corte y por lo tanto deslizamiento.

#### **Estructuras Geológicas**

Con el trabajo de campo se observó que existen capas que se encuentran inclinadas en la misma dirección del talud o ladera, formando superficies más susceptibles a deslizarse. (fotografía 4.1). También se determinó que la interestratificación de capas de suelos de diferentes naturalezas, en particular suelos de minerales arcillosos por tener una baja resistencia al corte, tienden a formar superficies de ruptura, especialmente si su inclinación es en la misma dirección del talud. De igual manera suelos granulares sueltos, no consolidados que no tienen resistencia por cohesión, son las capas más débiles del talud.



Fotografía 4.1 Materiales de naturaleza sensible y colapsable que causan pérdida de resistencia al corte del suelo. (UTM, WGS 84: 757041E; 21081N).

#### 4.4.2 Factores Detonantes

Factores que cambian una pendiente a un estado activamente inestable, es decir que causan ruptura de la superficie de falla o movimiento.

##### Vibraciones

Causadas tanto por ocurrencia de sismos o terremotos, como por el paso de maquinaria pesada. Para el primer factor, se tiene que la zona no presenta datos registrados de eventos sísmicos, pero existen registros de sismos de pequeña magnitud que alcanzan 3 – 3.5 de magnitud en poblados cercanos al lugar, como es el caso de la parroquia Nanegalito. (Portal Neotectonic Open Database). (Figura 4.5). Por lo que se estima que el factor sísmico no es importante en esta zona para generar inestabilidad.

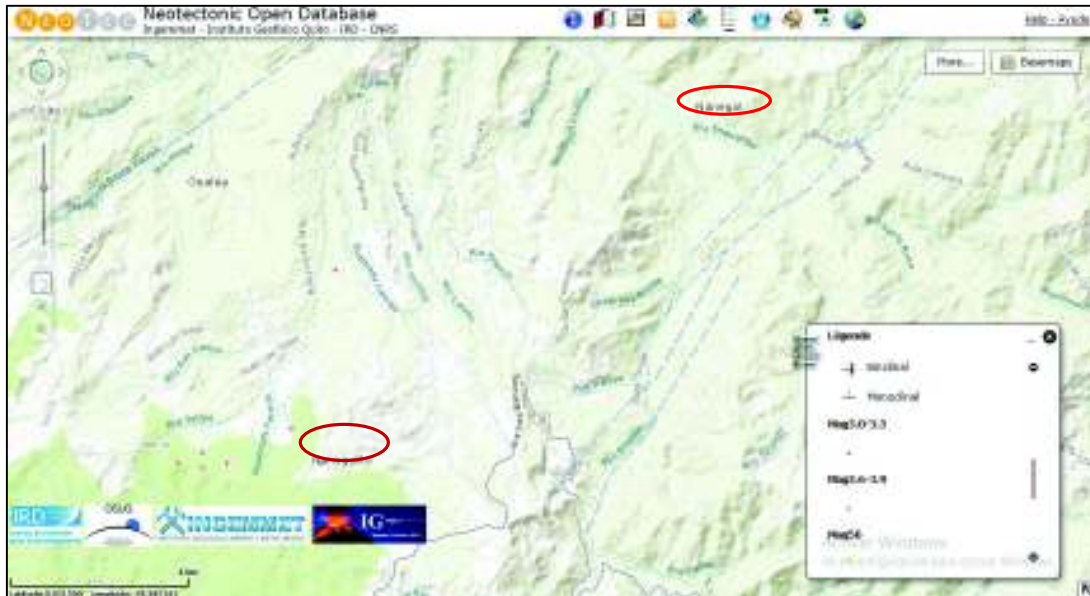


Figura 4.5 Actividad sísmica (Neotectonic Open Database, PMA – GCA).

El paso de maquinaria pesada es un factor que se debe tomar en cuenta ya que existe una vía que conduce al poblado de la Perla, la cual cruza por la parte superior de los taludes del proyecto; además de la vía del proyecto que lleva grandes maquinarias a la casa de máquinas.

##### Modificación de la pendiente de un talud

La modificación de la pendiente causada por actividad humana o por causas naturales puede resultar en un cambio en el ángulo estable del talud, situación que se ve reflejada en la construcción del canal de conducción de agua del proyecto.

##### Cambios en las características hidrológicas

Fuertes lluvias pueden saturar los suelos o rocas del lugar, reduciendo el contacto entre granos y reduciendo el ángulo de reposo del talud; las lluvias fuertes también pueden saturar la roca o suelo incrementando su peso y generando deslizamientos.

Nanegal está ubicado en las estribaciones de la cordillera por lo que el clima es cálido húmedo y existen fuertes precipitaciones, las cuales son más intensas durante los meses de invierno, generalmente de enero a mayo, durante estos meses la actividad de los deslizamientos se incrementa.

Cambios en el sistema de aguas subterráneas pueden incrementar o disminuir la presión de los fluidos en las rocas y desencadenar un deslizamiento.

#### 4.5 Análisis de susceptibilidad a FRM

El análisis de susceptibilidad se describe como una evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación, volumen (o área) y distribución espacial de los deslizamientos los cuales existen o potencialmente pueden ocurrir en un área. Susceptibilidad puede también incluir una descripción de la velocidad e intensidad de la existencia o potencial deslizamiento. (Flentje P. et al., 2007).

Orozco (2017) en su trabajo utiliza la metodología propuesta por Dotor (2004) la cual analiza las variables que tienen una mayor relación con la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa asignándole un porcentaje de acuerdo a la información disponible, las observaciones realizadas en campo y los resultados de los ensayos de laboratorio; donde la mayor incidencia está relacionada con porcentajes más altos y la menor incidencia con porcentajes bajos.

Para el presente estudio se tomó en cuenta la pendiente, litología, propiedades geomecánicas y contenido de agua como variables a estudiar donde las dos últimas representan las variables con mayor incidencia (tabla 4.6). Es necesario señalar que la susceptibilidad se realizó para los taludes que se encuentran a lo largo del canal.

Tabla 4.6 Variables utilizadas para el análisis de susceptibilidad.

Variable	Importancia %
Pendiente	10
Litología	20
Propiedades geomecánicas	30
Contenido de agua	40
<b>Total</b>	<b>100</b>

##### 4.5.1 Ponderación de la variable pendiente

El uso del mapa de pendientes constituye una importante herramienta al momento de analizar la susceptibilidad de un terreno a deslizamientos. Para el área de estudio se realizó un mapa de pendientes a partir de un DEM de cuatro metros y un GIS.

El mapa fue concebido para que muestre cuatro rangos de pendiente, esto debido a que las pendientes son moderadas. Como se puede observar en la figura 4.6, el canal de conducción de agua atraviesa pendientes que son baja pendiente, entre 12° a 30°, razón por la cual se le ha asignado un grado de importancia de 10% equivalente a 10 puntos (tabla 4.7).

Tabla 4.7 Valores ponderados de la variable pendiente

Rango de pendiente (°)	Valor ponderado
0-12	2
12 – 30	5

30 – 45	7
>45	10

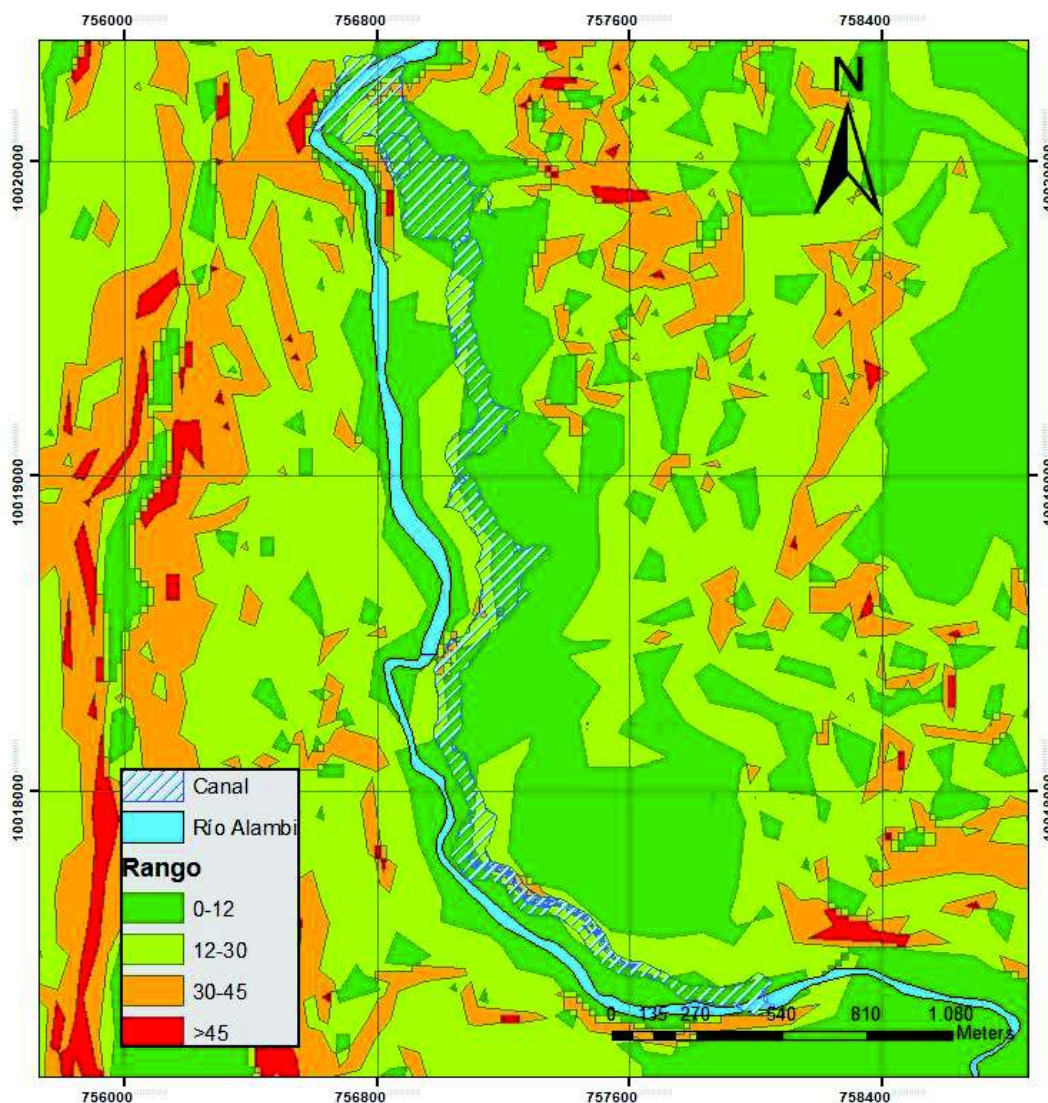


Figura 4.6 Mapa de pendientes de la zona de estudio.

#### 4.5.2 Ponderación de la variable litología

La valoración de esta variable se basa en un análisis semicuantitativo relacionado al hecho de que los taludes estudiados se encuentran específicamente en los depósitos cuaternarios que cubren la zona; la granodiorita que aflora en el lugar se encuentra lejana a los deslizamientos ocurridos. Razón por la cual a esta variable se le ha asignado un valor de 20% equivalente a 20 puntos (tabla 4.8).

Tabla 4.8 Valores ponderados de la variable litología

Litología	Valor ponderado
Granodiorita	10
Depósitos cuaternarios	20

### 4.5.3 Ponderación de la variable humedad del terreno

Para realizar un análisis del parámetro de la humedad del terreno, se realiza un balance hídrico simplificado con los valores promedio mensuales de precipitación, tomando como referencia una evapotranspiración potencial de 125 mm/mes, es decir precipitaciones menores a 125 mm/mes no generan un aumento de la humedad del terreno, pero precipitaciones mayores a 125 mm/mes sí aumentan la humedad del terreno. Cuando existen valores superiores a 250mm/mes se considera que existe un alto aporte de humedad al suelo. (Mora, R. et al, 2002).

Se asigna valores al promedio de precipitación mensual, como se muestra en la tabla 4.9, de acuerdo, al parámetro de evapotranspiración potencial de la siguiente manera: <125 mm/mes = 0; entre 125 – 250 mm/mes= 1; y >125 mm/mes = 2. Finalmente se realiza una suma de los valores correspondientes a los doce meses del año, generando un valor que va entre 0 y 24, y cuya interpretación se encuentra en la tabla 4.10.

Tabla 4.9 Valores promedio de precipitación mensual

Mes	Precipitación mensual (mm)	Valor asignado
Enero	543.6	2
Febrero	442.4	2
Marzo	298.3	2
Abril	315.5	2
Mayo	145.7	1
Junio	88.4	0
Julio	42.6	0
Agosto	8.9	0
Septiembre	14.5	0
Octubre	81.3	0
Noviembre	177.0	1
Diciembre	53.3	0
<b>Suma de valores asignados</b>		10

Tabla 4.10 Valoración del parámetro de humedad del terreno (Mora, R. et al., 1992).

Suma de valores asignados	Descripción	Valoración ponderado
0-4	Muy bajo	8
5-9	Bajo	16
10-14	Medio	24
15-19	Alto	32
20-24	Muy alto	40

Los datos de los valores pluviométricos fueron obtenidos del anuario meteorológico del INAMHI del 2012. De acuerdo a la metodología de Mora, R. (2002) para la valoración de la humedad del terreno, del 40% del grado de importancia asignado para la variable de contenido de agua, le corresponde 24 puntos.

#### 4.5.4 Ponderación de la variable propiedades geomecánicas

(Orozco 2017) menciona en su estudio, que la metodología seguida, no toma en cuenta las características geomecánicas, sin embargo, debido a la importancia que tiene esta variable se hará el análisis de la misma.

De acuerdo, a la sección 4.3 si bien las tres unidades geomecánicas descritas presentan características que favorecen la generación de fenómenos de remoción en masa, a la unidad MH se le ha asignado un valor de 30 puntos, debido a las observaciones de campo realizadas donde se percibe que los deslizamientos son de grandes dimensiones. (tabla 4.10)

Tabla 4.11 Valores ponderados de la variable geomecánica.

Unidad Geotécnica	Valor ponderado
SM	10
ML	20
MH	30

Los valores ponderados de las variables (pendiente, litología, contenido de agua y propiedades geomecánicas) fueron sumados en cada deslizamiento (tabla 4.13), obteniendo de esta manera 30 puntos como valor mínimo y 100 puntos como valor máximo; estableciendo de esta manera 5 intervalos para la susceptibilidad. (tabla 4.12).

Tabla 4.12 Valores ponderados de susceptibilidad posibles para cada deslizamiento.

Susceptibilidad	Intervalo
Muy baja	30-45
Baja	45-60
Media	60-75
Alta	75-90
Muy alta	90-100

Tabla 4.13 Valores ponderados de susceptibilidad posibles para cada deslizamiento.

Id	Pendiente	Litología	Contenido de agua	Propiedades geomecánicas	Suma	Susceptibilidad
Dd01	5	10	24	20	59	Baja
Dd02	2	10	24	20	56	Baja
Dd03	2	10	24	20	56	Baja
D01	5	10	24	20	59	Baja
D02	2	10	24	20	56	Baja



D03	2	10	24	10	46	Baja
D04	2	10	24	10	46	Baja
D05	2	10	24	10	46	Baja
D06	2	10	24	30	69	Media
D07	2	10	24	20	56	Baja
D08	2	10	24	30	66	Media
D09	2	10	24	30	66	Media
D10	5	10	24	30	69	Media
D11	2	10	24	20	56	Baja
D12	2	10	24	10	46	Baja
D13	2	10	24	20	56	Baja
D14	2	10	24	20	56	Baja
D15	2	10	24	20	56	Baja
D16	2	10	24	20	56	Baja
Dd04	5	10	24	20	59	Baja

## 4.6 Drenaje

Una de las formas más efectivas para reducir las fuerzas que producen el movimiento o para aumentar las fuerzas resistentes al movimiento, es el control y manejo de las aguas superficiales y subterráneas que afectan a un talud, es decir mediante la disminución de la presencia de agua en el talud se puede reducir la inestabilidad de los taludes, minorando el peso de la masa inestable, disminuyendo el nivel freático, y por lo tanto la presión intersticial. Los drenajes además de ser obras de fácil diseño y construcción, resultan obras económicas para la estabilidad de taludes. (Suárez J, 2009).

Existen varios sistemas de drenaje los cuales pueden ser superficiales como zanjas de drenaje y canalización; o profundos como drenes horizontales, drenes verticales, galerías de drenaje y pantallas drenantes.

Los drenajes superficiales evitan que el agua de escorrentía superficial aumente el nivel freático y la presión intersticial, al mismo tiempo evitan la acción erosiva del agua sobre el talud. Entre los sistemas superficiales se encuentran las zanjas o cunetas las cuales generalmente se los diseña para que estén contruidos en la cabecera del talud o a sus costados; también está la canalización, desvío o impermeabilización de flujos de ojos de agua (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

Los drenajes profundos disminuyen el nivel freático y evacúan el agua del interior del talud. Este tipo de perforaciones debe tomar en cuenta el tipo de litología a tratar, el caudal a reducir y deben alcanzar las cotas a las que se encuentra el agua. (Gonzales de Vallejo et al., 2004).

En la figura 4.7 se encuentran algunas medidas de drenaje y protección de taludes.

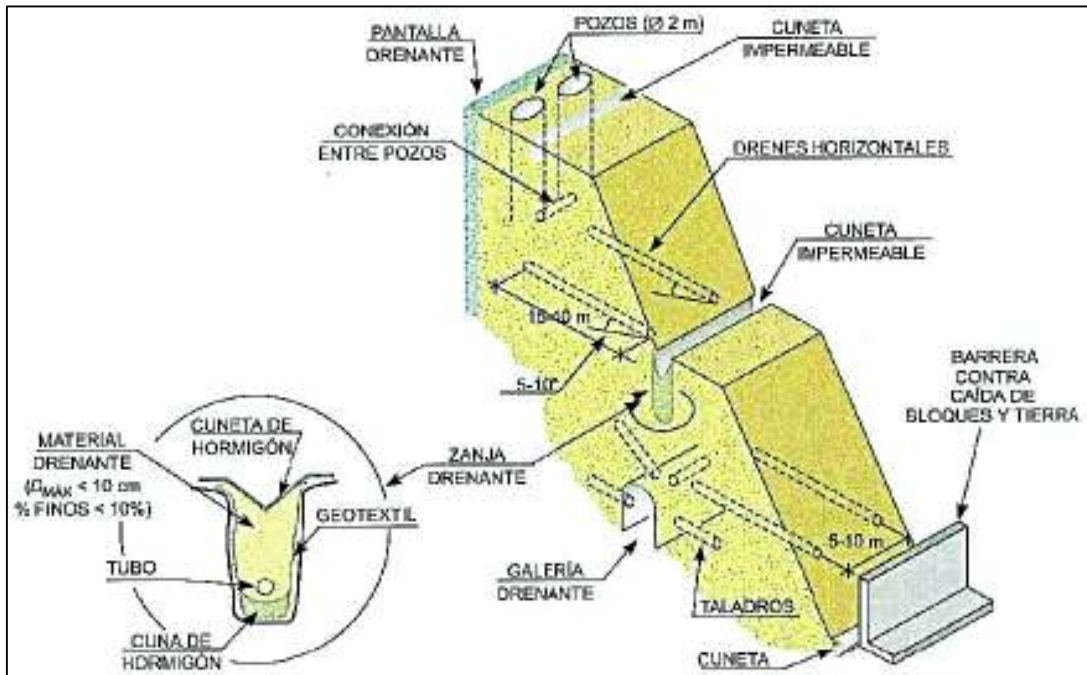


Figura 4.7 Medidas de drenaje y protección de taludes (Uriel, 1991). Tomado de Gonzales de Vallejo et al., 2004.

## 4.7 Geosintéticos

Koerner. R., 2012, recoge la definición de geosintéticos como un producto manufacturado planar elaborado a partir de materiales poliméricos usados con suelo, roca, tierra u otro tipo de materiales geotécnicos relacionados a la ingeniería; son considerados una parte integral de los proyectos, estructuras o sistemas ejecutados por el ser humano.

Dentro de las ventajas sobre el uso de geosintéticos se encuentran las siguientes:

- Su producción esta contralada bajo normas ambientales
- Pueden ser instaladas rápidamente
- Generalmente reemplazan recursos de materia prima
- En algunos casos, su uso es requerido por las regulaciones de cada país
- Generalmente reemplazan diseños difíciles que usan suelo u otro material de construcción.
- Están siendo comercializados en grandes proporciones y se encuentran ampliamente disponibles
- Se están integrando al campo a través de especificaciones genéricas.
- Tienen un costo ventajosamente competitivo frente a otros materiales de construcción
- La huella de carbón que deja es mucho más baja que otras soluciones tradicionales.

Las principales funciones que tiene un geosintético son: separación, reforzamiento, filtración, drenaje y almacenamiento de líquidos y gases.

Los geosintéticos se clasifican en siete tipos de acuerdo a su método de fabricación: geotextiles, geomallas, geomembranas, georedes, geocompuestos, revestimientos geosintéticos de arcilla y geoespumas. Dentro de este estudio hablaremos

principalmente de los cuatro primeros tipos destacando su función principal y comparándolos con otros geosintéticos. (Tabla 4.14).

**Geotextiles.** Son tejidos hechos a partir de fibras sintéticas (figura 4.8), garantizando así que su biodegradación y su tiempo de vida no serán un problema. Las fibras sintéticas están hechas por materiales flexibles y porosos, características que permiten el paso de líquidos a través del geotextil a lo largo y ancho del mismo, pero en un grado muy variable. Principalmente sus usos están relacionados con la separación, reforzamiento, filtración y/o drenaje. (Koerner, 2012).



Figura 4.8 Ejemplo de geotextiles tejidos con fibras sintéticas. Tomado del sitio web Maccaferri.

**Geomallas.** Son plásticos formados dentro de una configuración de una red, es decir tienen grandes aperturas, con la apariencia de una malla abierta. Están construidas bajo métodos estandarizados, generalmente a través de un proceso de tejido, pero también se forman uniendo varillas o uniendo correas donde se puede mejorar sus propiedades físicas estrechando sus celdas en una o dos direcciones (figura 4.9). Exclusivamente se la utiliza como refuerzo de materiales. (Koerner, 2012).

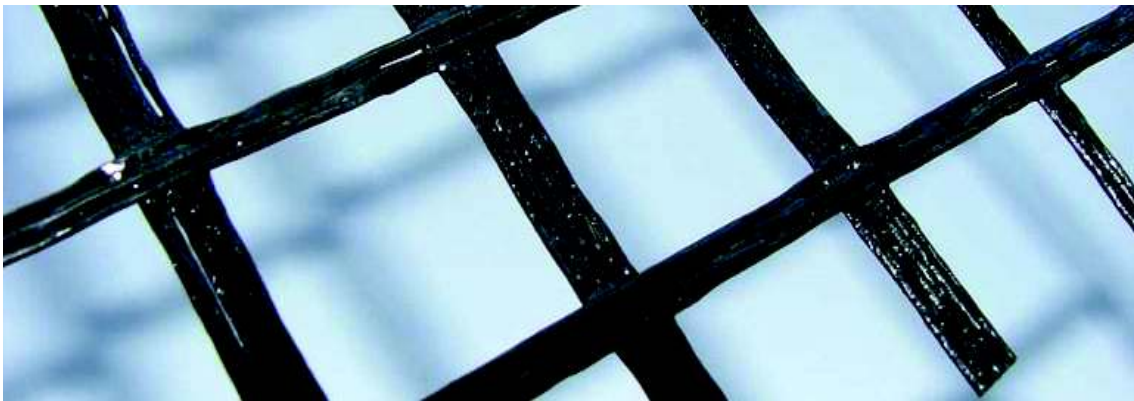


Figura 4.9 Geomallas producidos a partir de filamentos de poliéster y con resistencia a la tracción. Tomado del sitio web Maccaferri.

**Geomembranas.** Son materiales relativamente delgados, son láminas impermeables de hechas a base de polímero, su uso principalmente está relacionado a contener o como barreras de líquidos y gases. (Koerner, 2012).

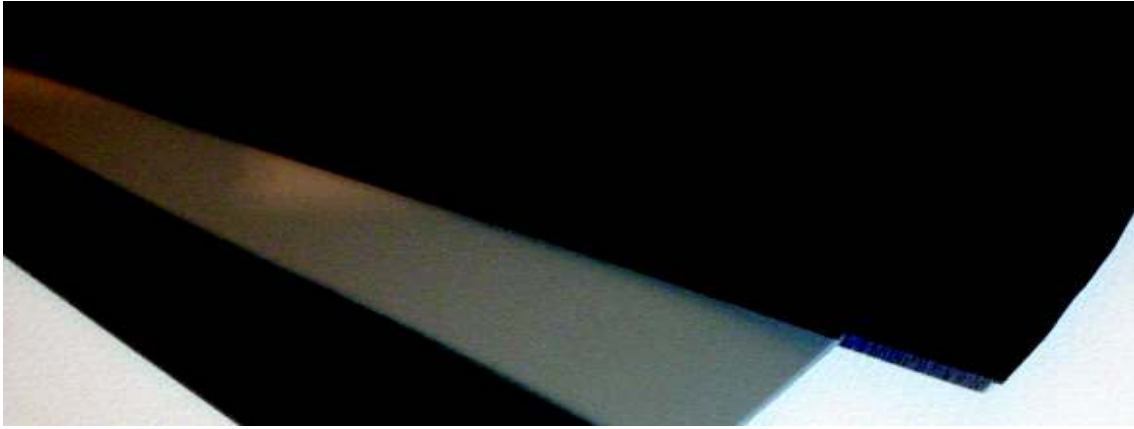


Figura 4.10 Geomembranas fabricada a partir de filamentos de polímeros como PVC. Tomado del sitio web Corpia.

**Georedes.** Son materiales tipo malla abierta formados por dos conjuntos de hebras poliméricas gruesas que tienen una disposición paralela interactuando en un ángulo constante. La malla tiene como una porosidad que le permite llevar grandes cantidades de líquidos o gases. (Koerner, 2012).

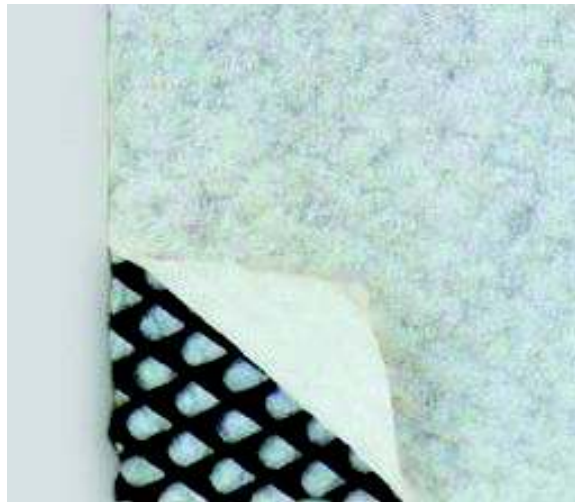


Figura 4.11 Georedes de polietileno con dos geotextiles de polipropileno. Tomado del sitio web Projar.

Tabla 4.14 Comparación de geosintéticos a través de su función principal. Tomado de Koerner, (2012).

Tipo de geosintético	Función Principal				
	Separación	Reforzamiento	Filtración	Drenaje	Almacenamiento
Geotextil	X	X	X	X	
Geomalla		X			
Geomembrana					X
Georedes				X	
Geosintéticos de arcilla					X
Geocompuestos	X	X	X	X	X
Geoespuma	X				

## 4.8 Análisis de estabilidad de los taludes estudiados

La estabilidad de los taludes fue estudiada a partir de simulaciones realizadas con el software Slide 5.014. Con este software se modelaron las condiciones iniciales de los taludes afectados, para posteriormente generar un modelo donde a partir de las características geomecánicas y trabajo de campo realizado, aplicar medidas de estabilización se genere un equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, y así obtener el Factor de Seguridad (F.S.), más adecuado.

El factor de seguridad en teoría indica si un sitio es estable o no, si el  $F.S > 1$  se considera un talud estable, y en caso de tener  $F.S < 1$  se considera inestable. Para algunos casos y diferentes condiciones algunos autores recomiendan  $F.S > 1.2$  o  $1.5$  dependiendo de las condiciones naturales y el nivel de incertidumbre de los datos obtenidos.

A continuación, se describen los sitios en orden de abscisado, desde 0+000 a 3+500:

### 4.8.1 Deslizamiento en 0+150 (D-011)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 26/04/2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Agrícola

Las simulaciones en este sitio mantuvieron un talud estable con factores de seguridad mayores a 3,2 e incluso en condiciones pseudoestáticas el factor de seguridad en el talud es de 1,8 (Figura 4.12.), lo cual indica que este sitio es estable a pesar de la erosión producida por el agua. (Fotografía 4.2.). el tipo de movimiento que se observa es del tipo traslacional.



Fotografía 4.2 Deslizamiento D-011. (UTM, WGS 84: 757742E; 17383N).

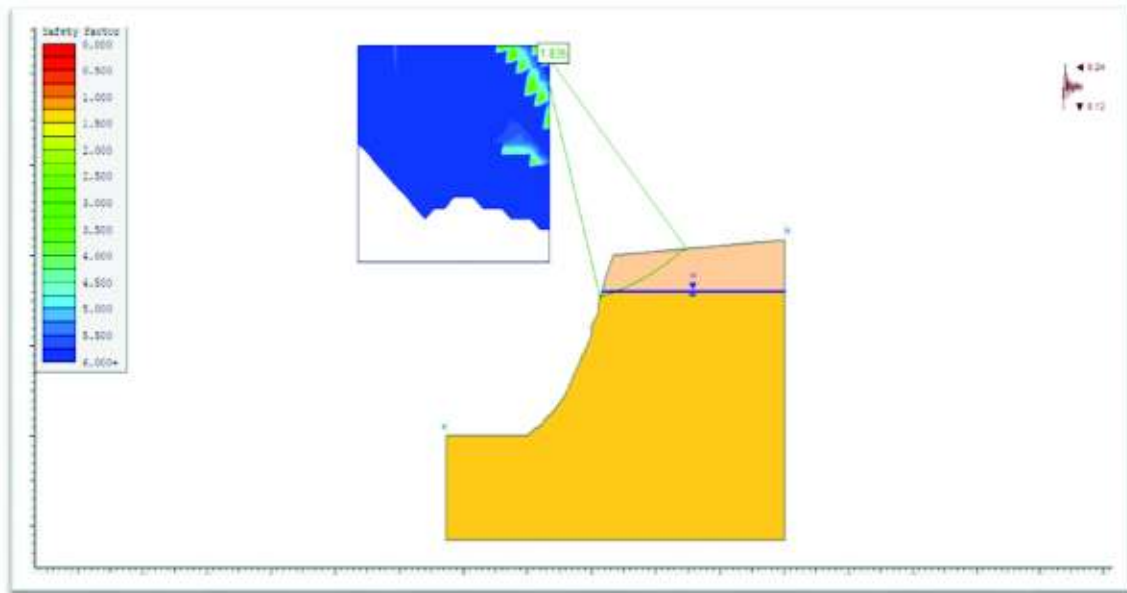


Figura 4.12 Perfil del talud D-011 sin ninguna intervención y en condiciones pseudoestáticas.

#### 4.8.2 Deslizamiento en 0+340 (D-016)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** febrero de 2016.

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daños Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería

Es un deslizamiento traslacional ocurrido por el contacto entre materiales de diferentes características, arenas y aluvial. Se aprecia, además, la generación de surcos sobre el estrato de arenas causados por acción del agua (Fotografía 4.3). La altura del corte en el sitio es de 12 metros, y el factor de seguridad obtenido de las modelaciones alcanza un valor menor a 1 (Figura 4.13.).

Al realizar la simulación, retirando la saturación de agua en el material se obtiene un factor de seguridad mayor a 1,36 en condiciones estáticas, lo cual indica que es suficiente evitar que se sature con agua la capa superior con la construcción de cunetas de coronación. (Figura 4.14.).



Fotografía 4.3 Deslizamiento D-016. (UTM, WGS 84: 757594E; 17436N).

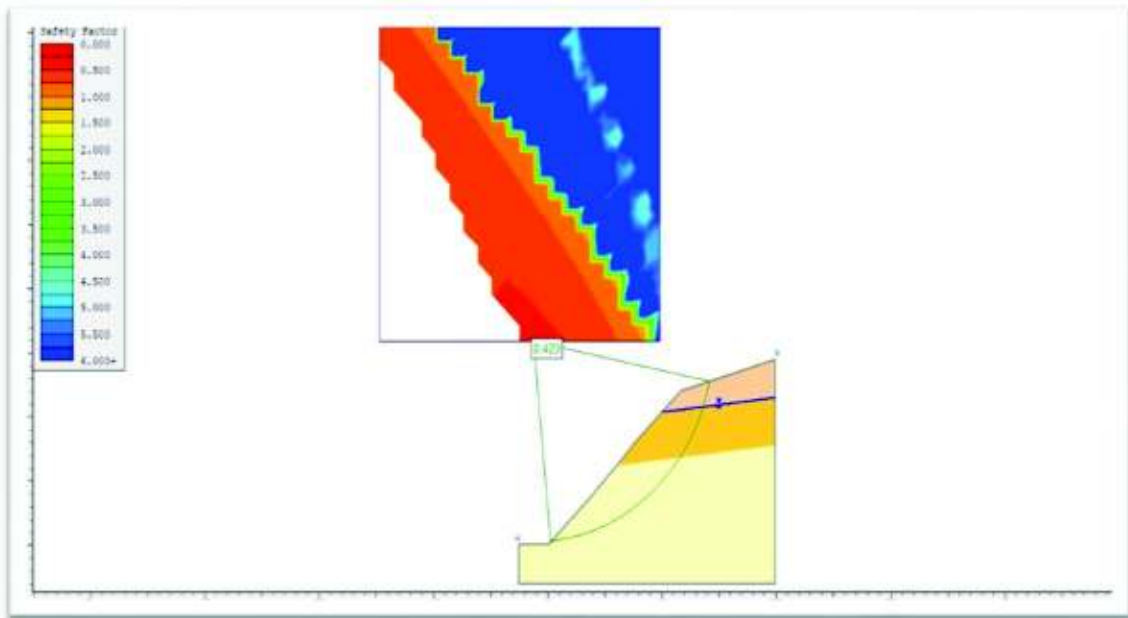


Figura 4.13 Perfil del talud D-016 sin ninguna intervención.

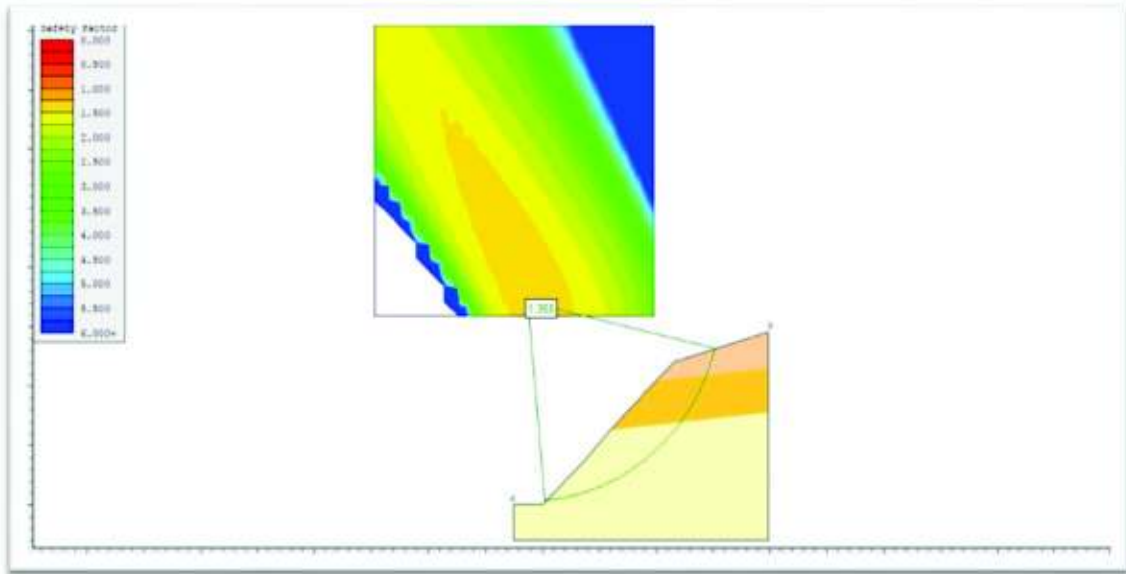


Figura 4.14 Perfil del talud D-016 aplicando métodos de protección y remediación.

#### 4.8.3 Deslizamiento en 0+535 (DD-001)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 05/03/2015

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Destrucción Total.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea, cultivos

**Uso de suelo:** Agrícola. Vía a 20 metros.

Este es uno de los sitios que representa mayor amenaza en el canal de conducción, han ocurrido varios eventos en el lugar y en dos ocasiones con afectación del canal. La altura del corte es de aproximadamente 28 metros, tiene un movimiento tipo traslacional y una berma que corta el talud a los 15 metros de altura (Fotografía 4.4). El primer estrato del talud es estable según los modelos realizados, no así las capas superiores que son las que generan inestabilidad, situación agravada por la presencia de nivel freático que mantiene las capas superiores saturadas (Figura 4.15).

Se propone realizar un corte que conste de dos bermas, la primera berma en la cota 1015 y que tenga un ancho de 5 m. en el material denominado aluvial; la segunda berma debe realizarse en el material de arcillas en la cota 1020 y con un ancho de 4m., ambas con H1:V1.

Además de realizar el corte se propone diseñar subdrenes y el uso de geosintéticos para evitar la saturación de los materiales que causan problemas. (Figura 4.16).





Fotografía 4.4 Deslizamiento DD-001. (UTM, WGS 84: 757444E; 17596N).

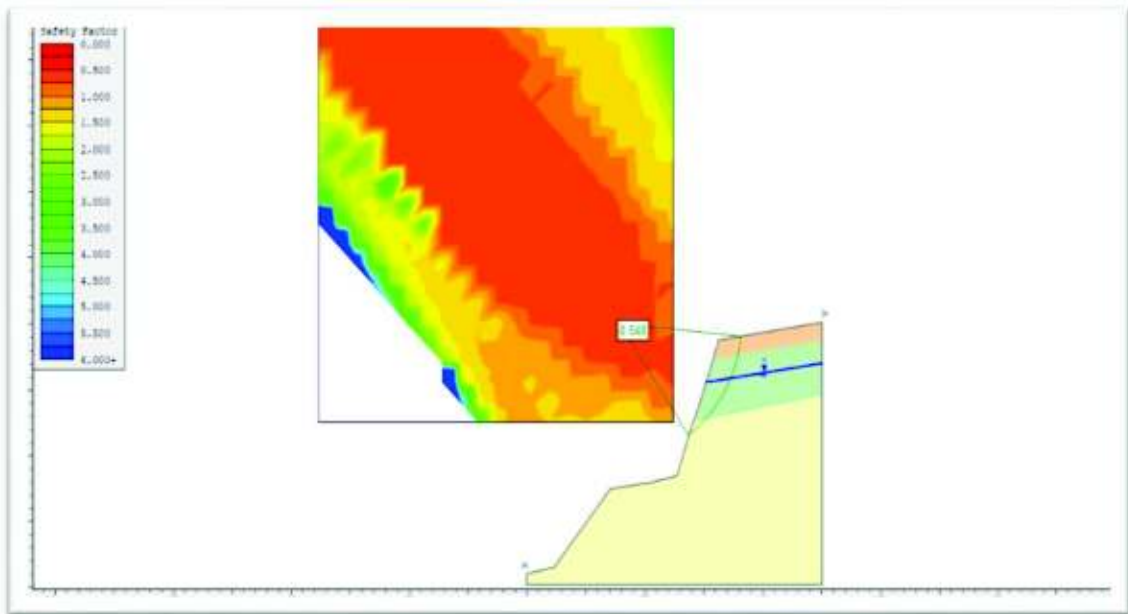


Figura 4.15 Perfil del talud DD-001 sin ninguna intervención.

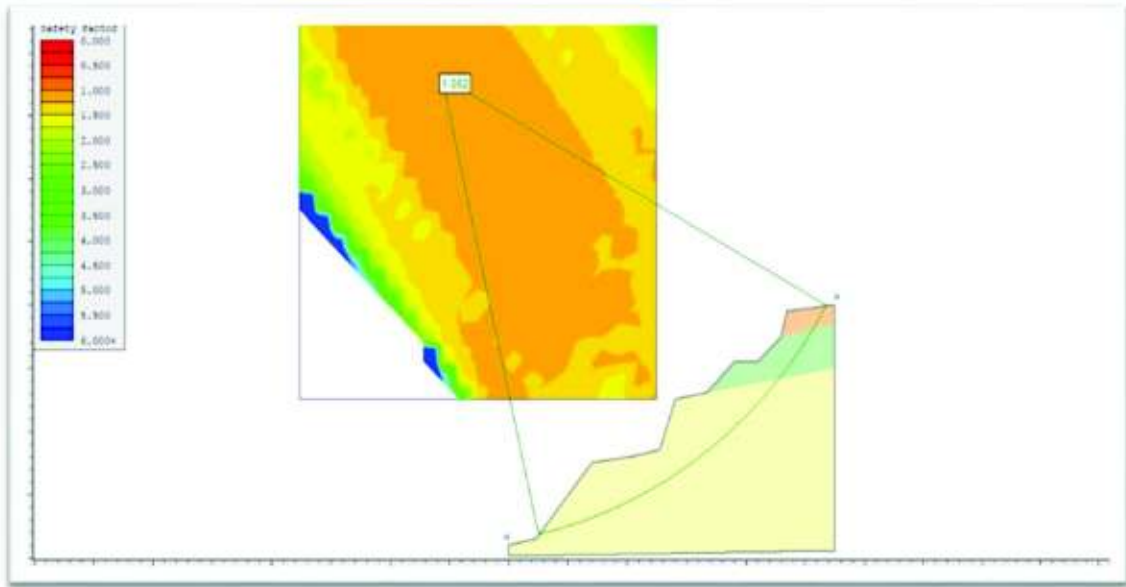


Figura 4.16 Perfil del talud DD-001 aplicando métodos de protección y remediación.

#### 4.8.4 Deslizamiento en 0+630 (DD-004)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** Año 2015

**Estado:** Inactivo

**Intensidad de Daño:** Destrucción Total.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea, cultivos, árboles.

**Uso de suelo:** Agrícola, ganadería.

En este lugar ocurrió un deslizamiento tipo rotacional a los inicios de las excavaciones, el cual dejó huella en el talud que se encuentra actualmente en el sitio. El lugar tiene 30 metros de altura aproximadamente y el ancho del escarpe fue de 60 metros. (Fotografía 4.5).

En este sitio el factor de seguridad obtenido es muy alto, sobrepasa el valor de 3,0 con la actual pendiente media de la ladera que corresponde a 35 grados (Figura 4.17). Sin embargo, debe considerarse bien la posibilidad de evitar que se sature y erosione con la construcción de cunetas de coronación o geosintéticos.



Fotografía 4.5 Deslizamiento DD-004. (UTM, WGS 84: 757332E; 17636N).

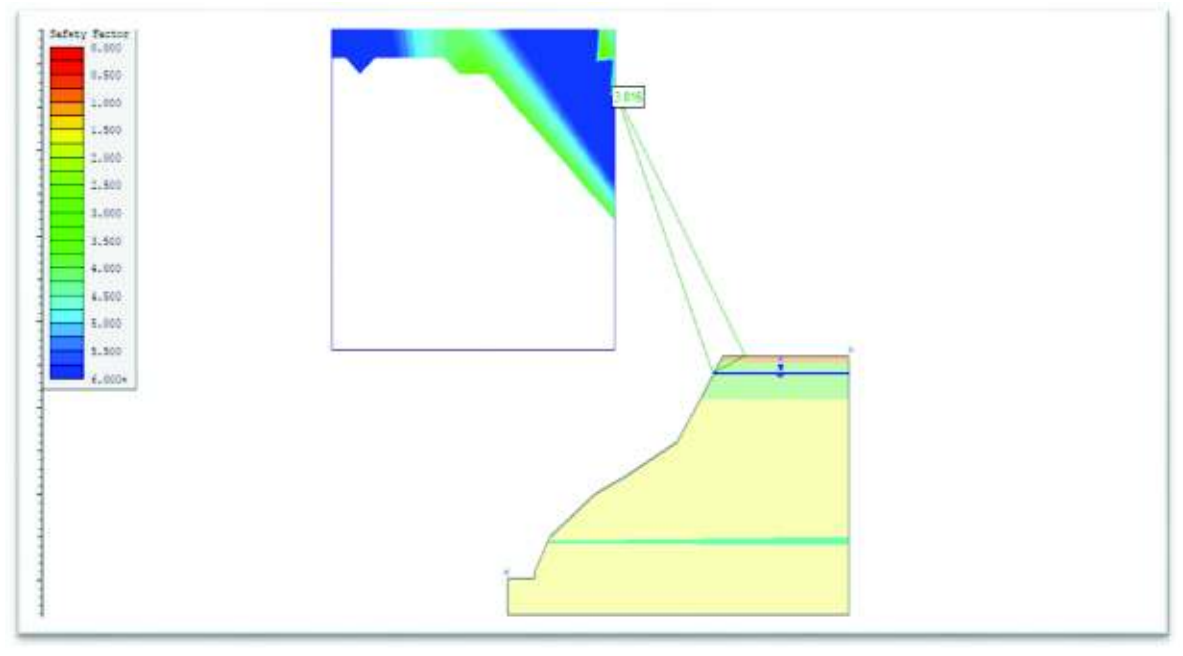


Figura 4.17 Perfil del talud DD-004 sin ninguna intervención.

#### **4.8.5 Deslizamiento en 0+730 (DD-002)**

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 06/30/2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daños Severo.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea, árboles.

**Uso de suelo:** Agrícola

Es un talud de 11 metros de altura identificado como un tipo de movimiento del tipo rotacional combinado con un movimiento de caída. A la base se tiene un material de tipo aluvial de mayor resistencia sobre el cual se encuentra un material arenoso. Se mantiene mucha humedad en el sitio. (Fotografía 4.6).

En condiciones actuales el factor de seguridad es menor a 1 (Figura 4.18.), sin embargo, al drenar el agua se obtiene una mejora notable. Por tanto, debe protegerse de la erosión con geosintéticos y colocar cunetas de coronación para evitar saturación en la capa.

Factor de seguridad del deslizamiento drenado 1.5 (Figura 4.19).



Fotografía 4.6 Deslizamiento DD-002. (UTM, WGS 84: 757252E; 17661N).

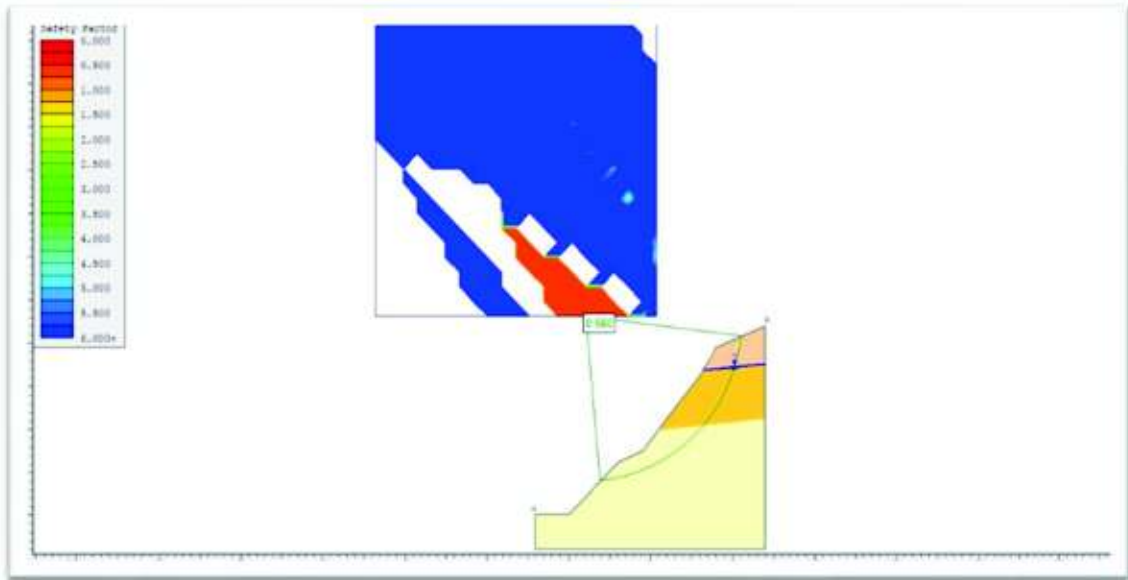


Figura 4.18 Perfil del talud DD-002 sin ninguna intervención.

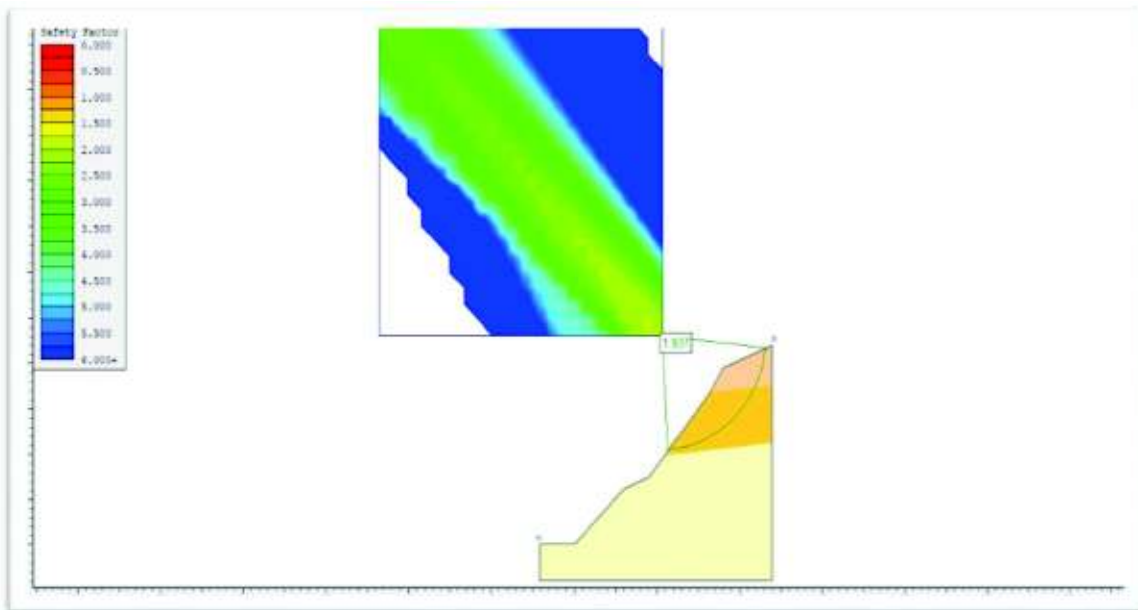


Figura 4.19 Perfil del talud DD-002 aplicando métodos de protección y remediación.

#### 4.8.6 Deslizamiento en 1+126 (D-001)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** marzo de 2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Leve.

**Cobertura:** Matorrales

**Uso de suelo:** Agrícola

Es un talud pequeño de 3 metros de altura donde ocurren movimientos del tipo rotacional y del cual se desprende material por causa del contraste estratigráfico. El estrato de la base es duro y la capa que se desprende es deleznable, y se afecta fácilmente por la acción del agua superficial, se socava y crea cárcavas que dan lugar a la inestabilidad (Fotografía 4.7).

El F.S en el sitio es 0,6 es decir inestable (Figura 4.20). Una vez tomadas las medidas de remediación, es decir evitando que se erosione y sature la capa de arenas se obtiene un  $F.S = 4.7$ . (Figura 4.21); por lo que se sugiere la construcción de cunetas de coronación y uso de geosintéticos.



Fotografía 4.7 Deslizamiento D-001. (UTM, WGS 84: 757095E; 17830N).

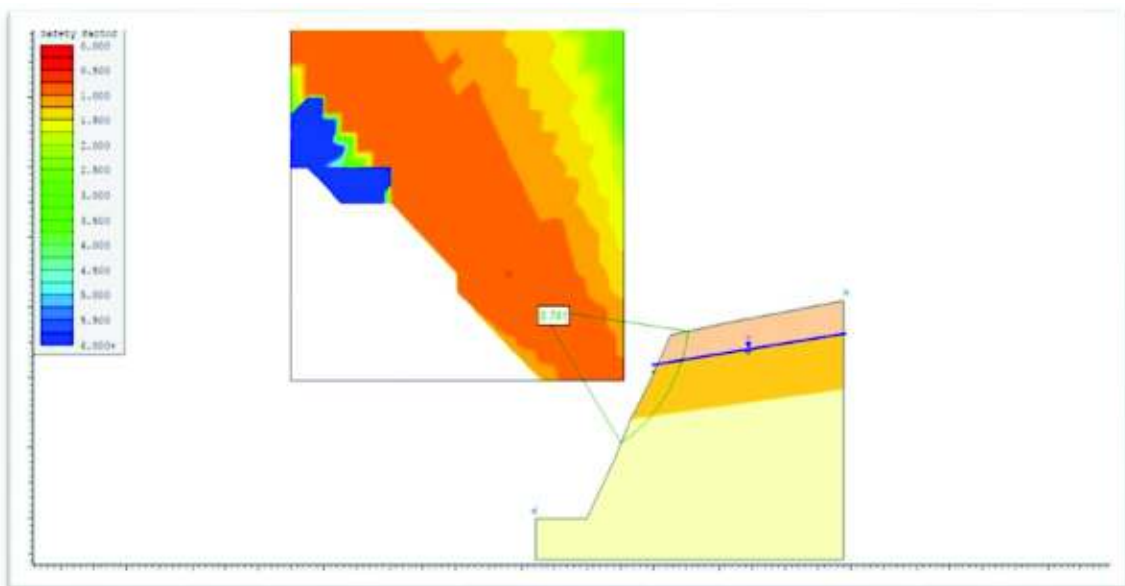


Figura 4.20 Perfil del talud D-001 sin ninguna intervención.

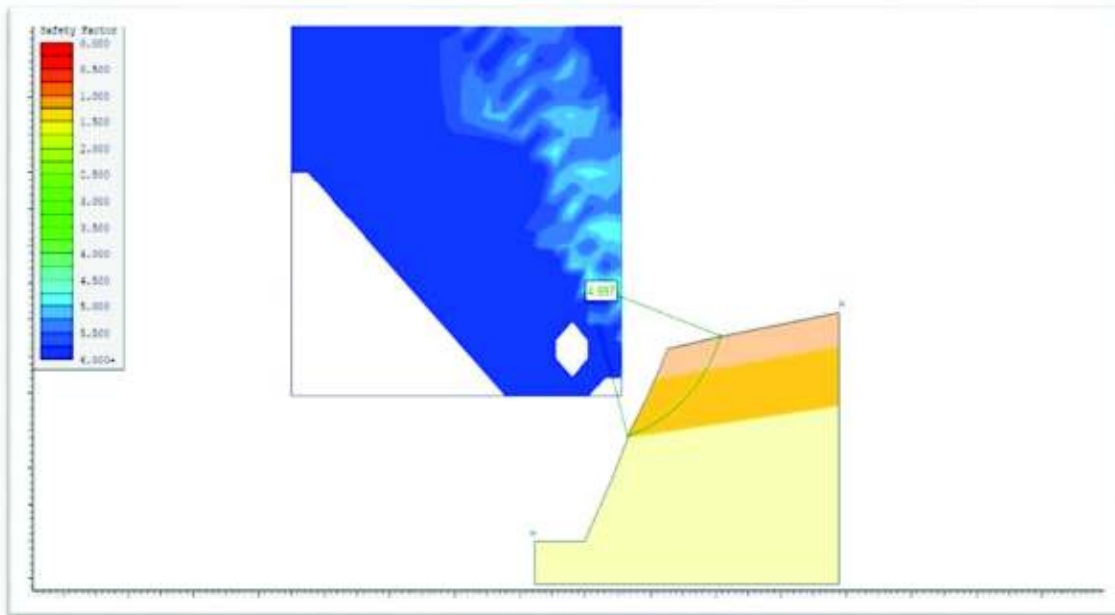


Figura 4.21 Perfil del talud D-001 aplicando métodos de protección y remediación

#### 4.8.7 Deslizamiento en 1+180 (D-002)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** marzo de 2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Leve.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

Es un talud de 7 metros de altura, con movimiento del tipo rotacional (Fotografía 4.8). En este sitio se ha determinado que el estrato inferior es estable y por erosión y saturación de agua el estrato superior falla, con un factor de seguridad de 0,5 promedio. (Figura 4.22).

La simulación muestra que protegiendo las arenas de la erosión y de la saturación se logra incrementar el factor de seguridad (Figura 4.23)., por lo que se recomienda cunetas de coronación y protección de la capa de arena con geosintéticos.



Fotografía 4.8 Deslizamiento D-002. (UTM, WGS 84: 757106E; 17987N).

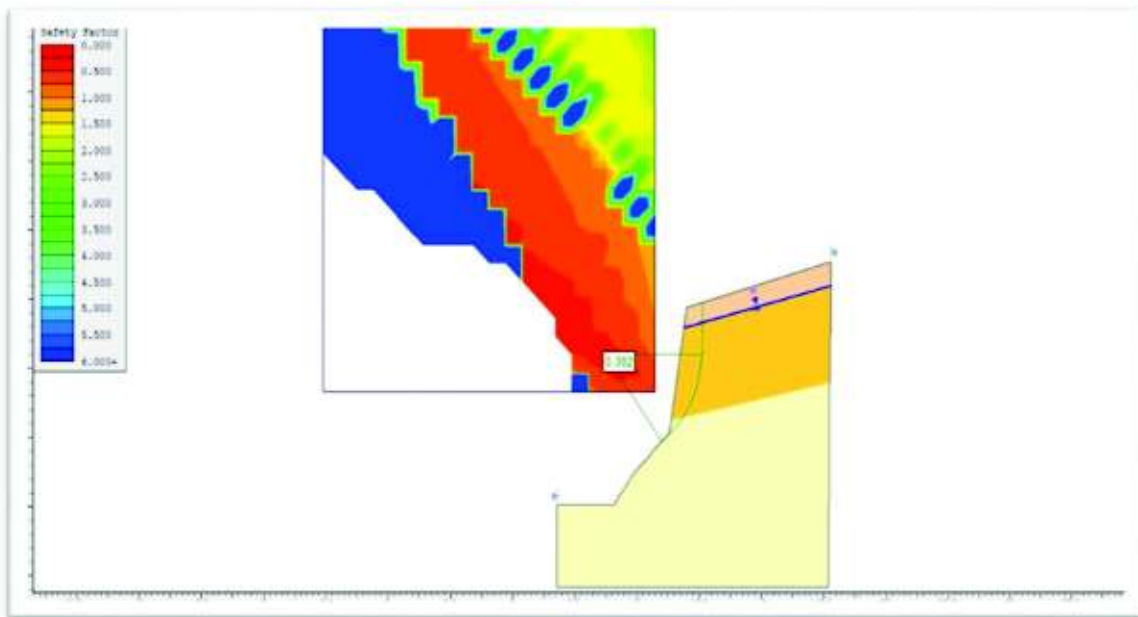


Figura 4.22 Perfil del talud D-002 sin ninguna intervención.



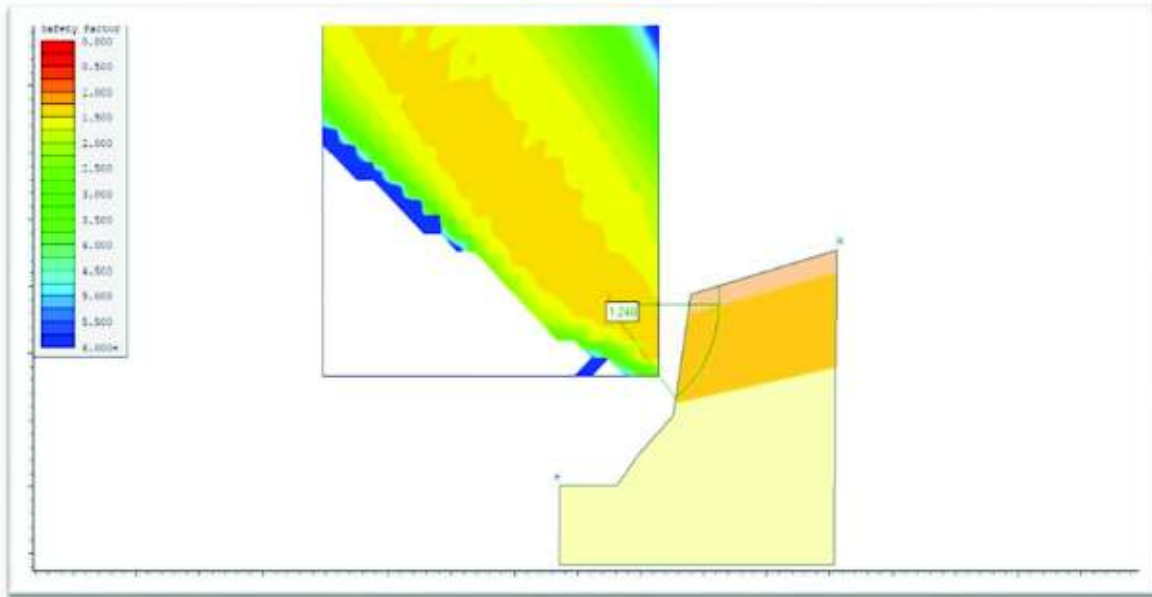


Figura 4.23 Perfil del talud D-002 aplicando métodos de protección y remediación.

#### 4.8.8 Deslizamiento en 1+430 (D-003)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 04/08/2016

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea, matorrales

**Uso de suelo:** Ganadería.

Es un talud de 5 metros de altura cuyo tipo de movimiento corresponde a un deslizamiento rotacional (Fotografía 4.9). La causa principal del deslizamiento corresponde a la erosión y saturación de las capas superiores. En la simulación se obtienen factores de seguridad inferiores a 0,5. (Figura 4.24).

La estabilidad se obtiene al evitar que las capas superiores se saturen (Figura 4.25)., se recomienda proteger de la erosión por agua con cunetas de coronación y suelo con geosintéticos.



Fotografía 4.9 Deslizamiento D-003. (UTM, WGS 84: 757017E; 18195N).

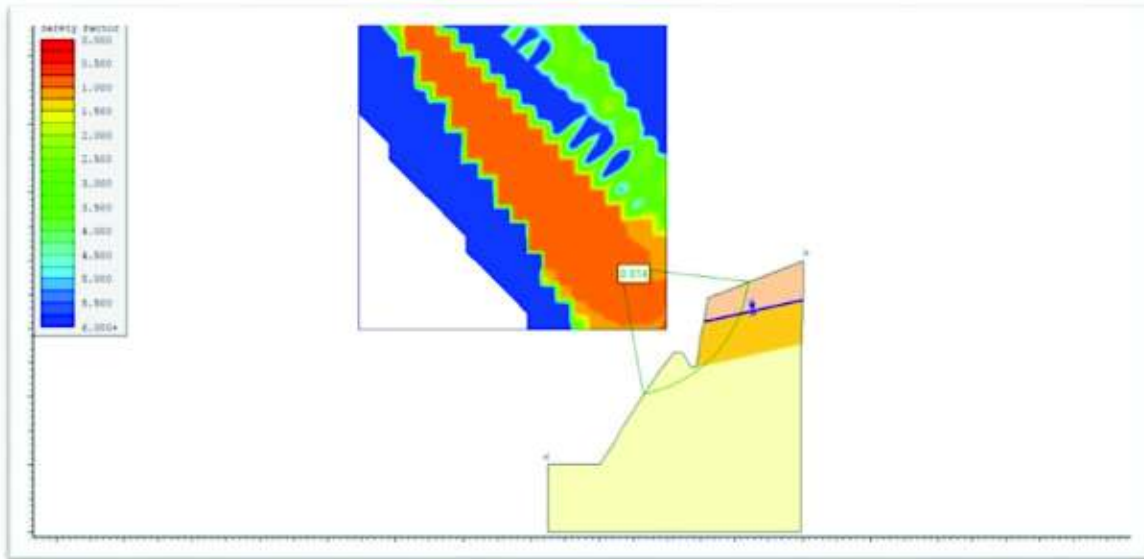


Figura 4.24 Perfil del talud D-003 sin ninguna intervención.

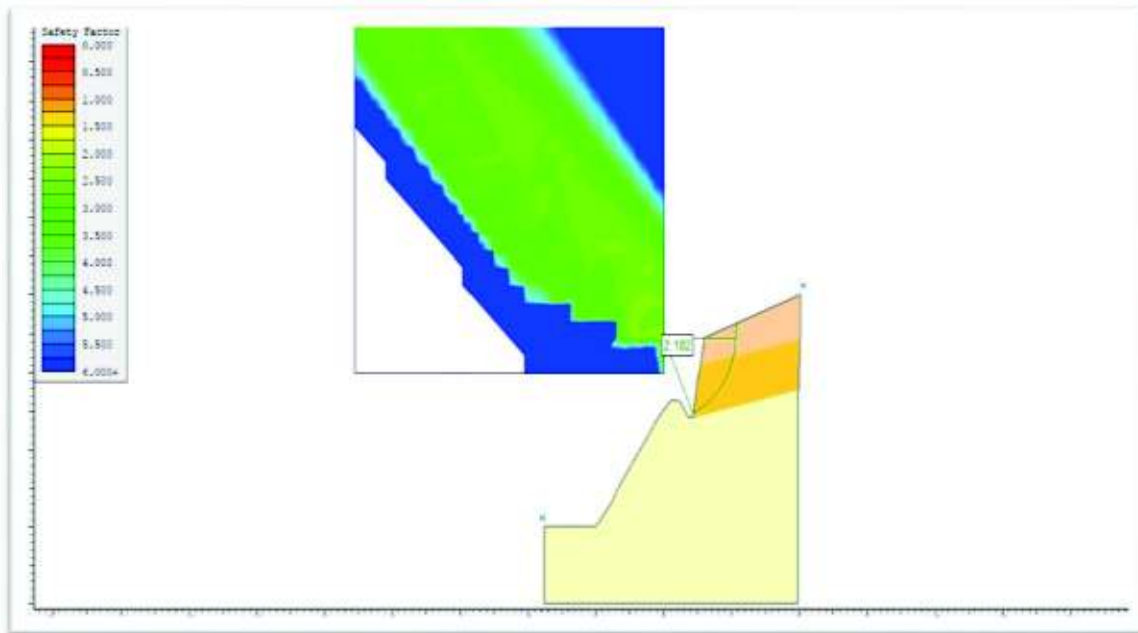


Figura 4.25 Perfil del talud D-003 aplicando métodos de protección y remediación.

#### 4.8.9 Deslizamiento en 1+510 (D-004)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 03/02/2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

En este sitio se tiene un corte de 11 metros de altura, donde el tipo de movimiento se lo identifica como deslizamiento rotacional producido por orientación desfavorable de las capas, saturación de agua y erosión por agua. (Fotografía 4.10)

Dentro del talud, son los estratos superiores los que fallan, la simulación muestra un factor de seguridad de 0,5 (Figura 4.26).

El valor del factor de seguridad mejora hacia la estabilidad una vez que se logra retirar el agua de los estratos, es decir evitando la saturación. Por tal razón es recomendable las cunetas de coronación y protección en esta capa superior para evitar erosión por escorrentía directa. (Figura 4.27).



Fotografía 4.10 Deslizamiento D-004. (UTM, WGS 84: 757038E; 18273N).

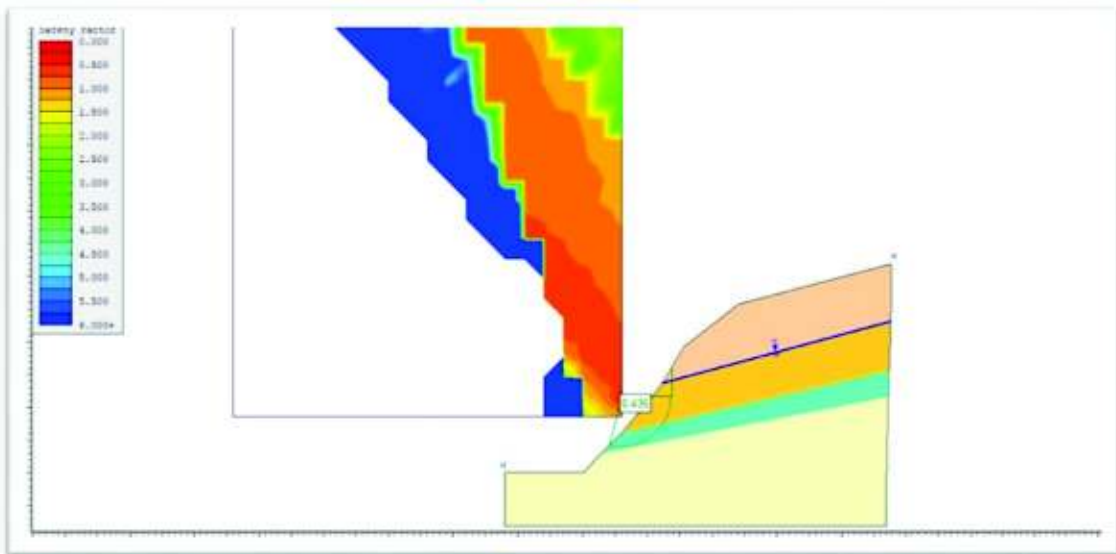


Figura 4.26 Perfil del talud D-004 sin ninguna intervención.

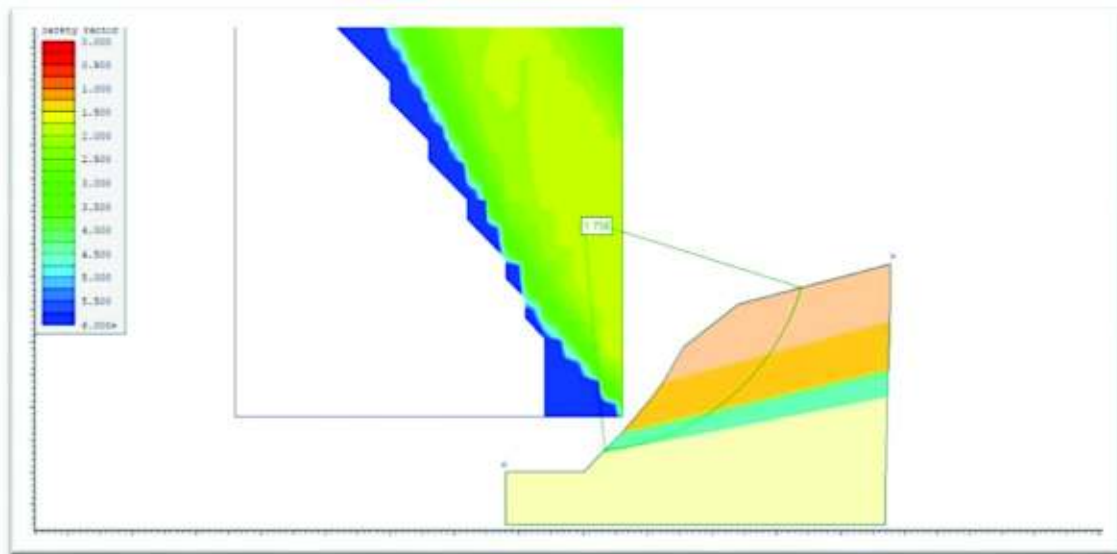


Figura 4.27 Perfil del talud D-004 aplicando métodos de protección y remediación.

#### 4.8.10 Deslizamiento en 1+680 (D-005)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** año 2015

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea, matorrales.

**Uso de suelo:** Ganadería.

En este sitio se tiene un corte de 11 metros de altura, donde se observa un pequeño deslizamiento rotacional ocurrido en los estratos superiores del talud, producido por orientación desfavorable de las capas, saturación y erosión por agua. (Fotografía 4.11).

Se sugiere diseñar cunetas de coronación para reducir la erosión causada por la escorrentía directa y subir el factor de seguridad 1,37 (Figura 4.28) a 1,55 (Figura 4.29).



Fotografía 4.11 Deslizamiento D-005. (UTM, WGS 84: 757079E; 18441N).

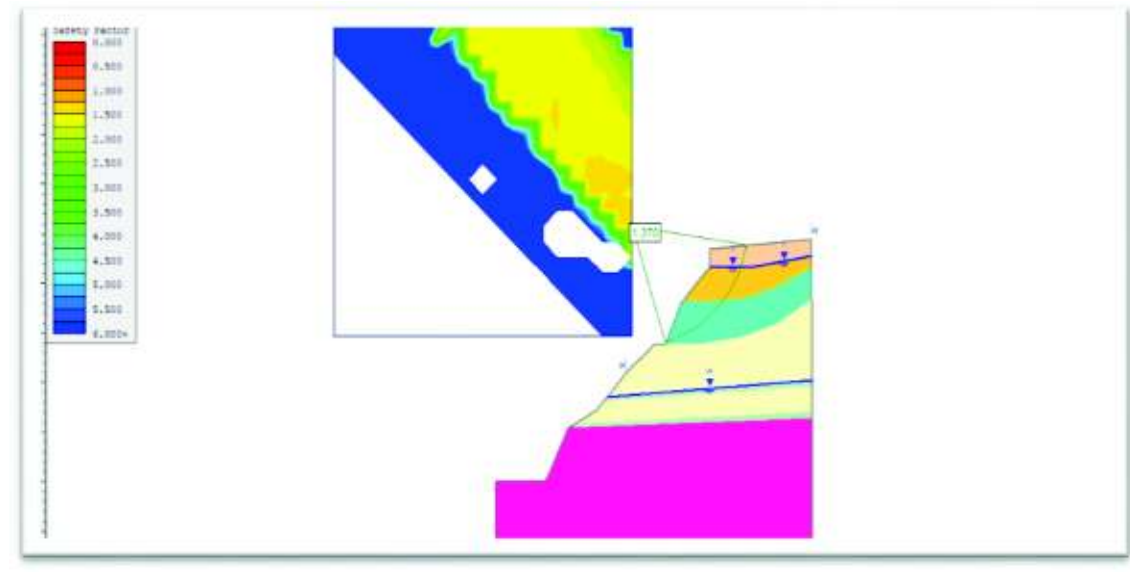


Figura 4.28 Perfil del talud D-005 sin ninguna intervención.

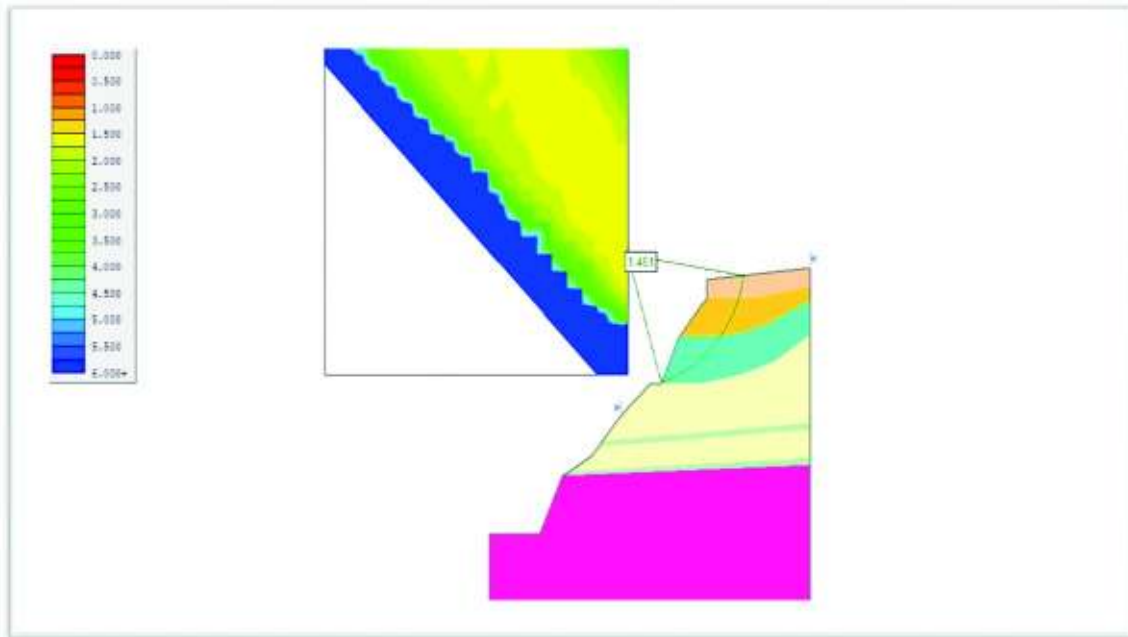


Figura 4.29 Perfil del talud D-005 aplicando métodos de protección y remediación.

#### 4.8.11 Deslizamiento en 1+710 (D-012)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 2015

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

Talud de 11 m. de altura, la clasificación del movimiento es del tipo rotacional. Este deslizamiento posee un gran nivel de humedad, lo que, ligado a la orientación de los materiales y a su meteorización, son la causa del movimiento. (Fotografía 4.12).

La modelación muestra que el nivel freático presente en el talud hace que el factor de seguridad sea bajo, 0.751, (Figura 4.30), por lo que se sugiere realizar un diseño de subdrenes para hacerlo estable, ya que, según las modelizaciones realizadas en el software, el talud se hace estable alcanzando un factor de seguridad de 2.93. (Figura 4.31).



Fotografía 4.12 Deslizamiento D-012. (UTM, WGS 84: 757083E; 18442N).

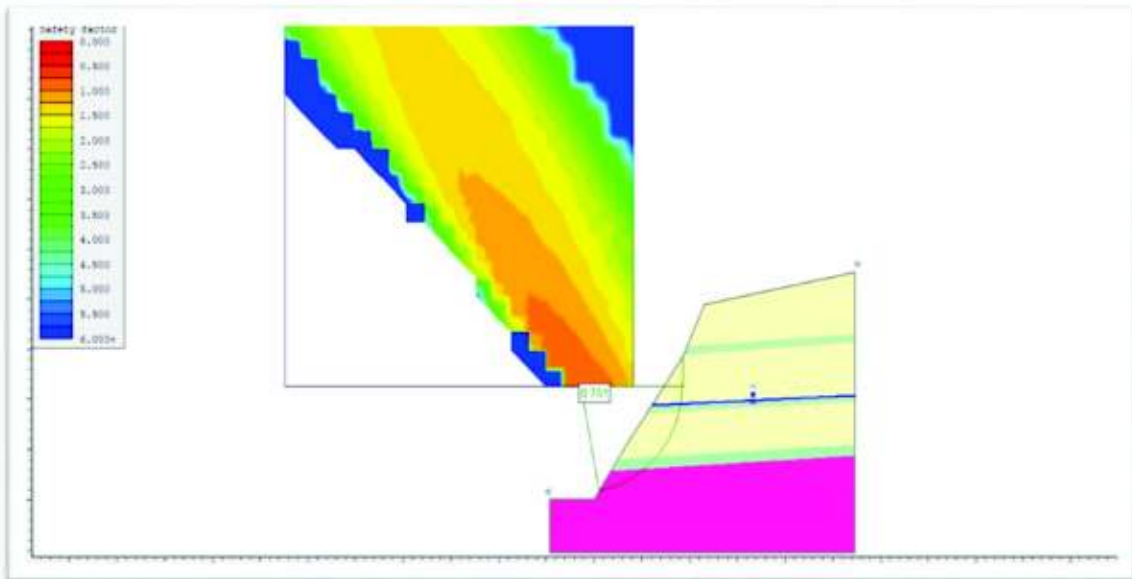


Figura 4.30 Perfil del talud D-012 sin ninguna intervención.



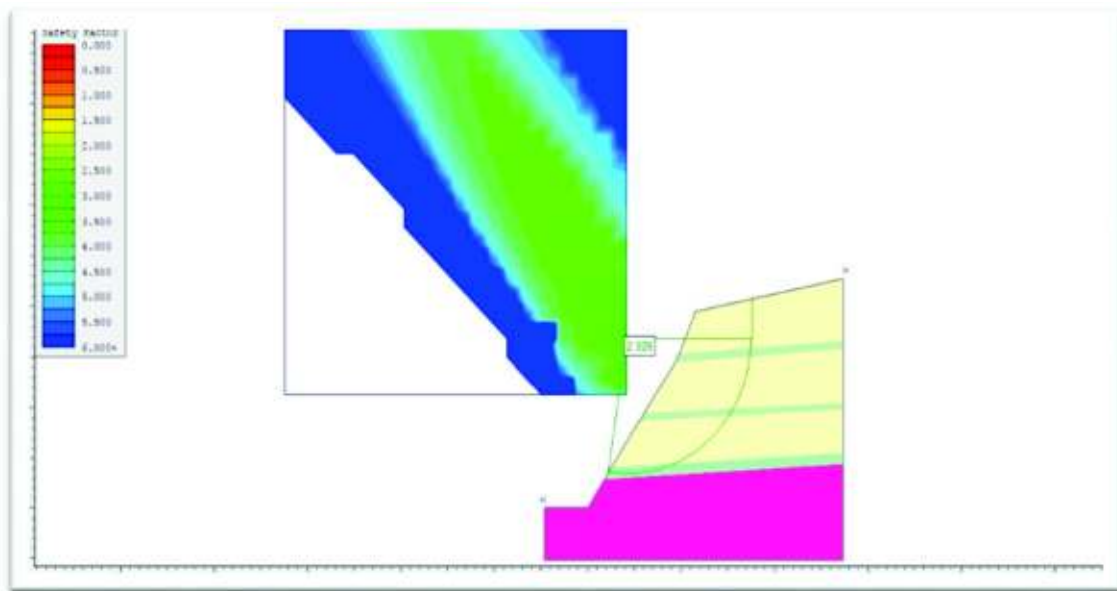


Figura 4.31 Perfil del talud D-012 aplicando métodos de protección y remediación

#### 4.8.12 Deslizamiento en 1+896 (D-014)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 07/07/2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Leve.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

Es un talud de 16 metros de altura donde se observa un pequeño deslizamiento del tipo rotacional que ocurre en los estratos superiores donde se encuentran pequeños lentes de arcilla. (Fotografía 4.13).

La simulación muestra un factor de seguridad de 1,66 el cual indica estabilidad, a pesar de la presencia de los lentes de arcilla (Figura 4.32), por lo que se recomienda, de ser posible, retirar el material que tiende a caerse o aplicar geosintético para evitar el contacto con el agua.



Fotografía 4.13 Deslizamiento D-014. (UTM, WGS 84: 757203E; 18579N).

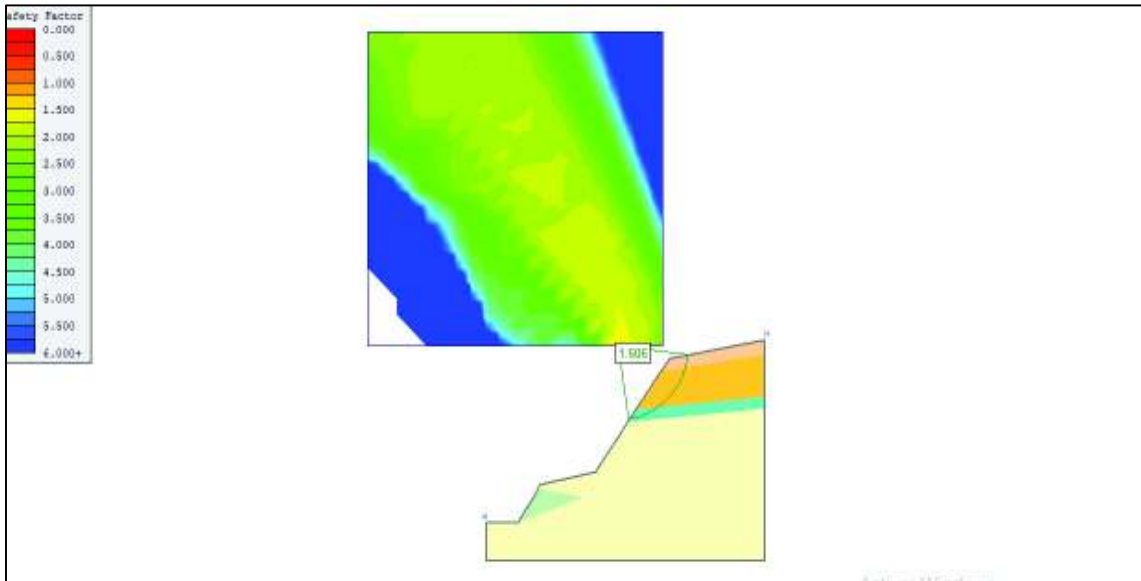


Figura 4.32 Perfil del talud D-014 sin ninguna intervención.

#### 4.8.13 Deslizamiento en 1+950 (D-015)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 09/05/2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

El corte en este sitio es de 22 metros de altura con una berma a los 12 metros de altura de 5 metros de ancho. La inestabilidad se aprecia en las capas que se encuentran en la parte superior de la berma y que corresponden a un material arcilloso. El tipo de movimiento se da en forma de caída de bloques. Aquí es posible observar como las arcillas en temporadas de lluvia se saturan, y en tiempos de sequía al estar expuestas al sol forman grietas y se caen en forma de bloques. (Fotografía 4.14)

La modelación del talud muestra un factor de seguridad menor a 1 (Figura 4.33). Se recomienda inclinar el talud con una inclinación de 1H:1V a los 17 metros, lo cual modifica notablemente la estabilidad a un FS de 1.6 (Figura 4.34). Además, aplicar subdrenes y proteger de la erosión.



Fotografía 4.14 Deslizamiento D-015. (UTM, WGS 84: 757224E; 18627N).

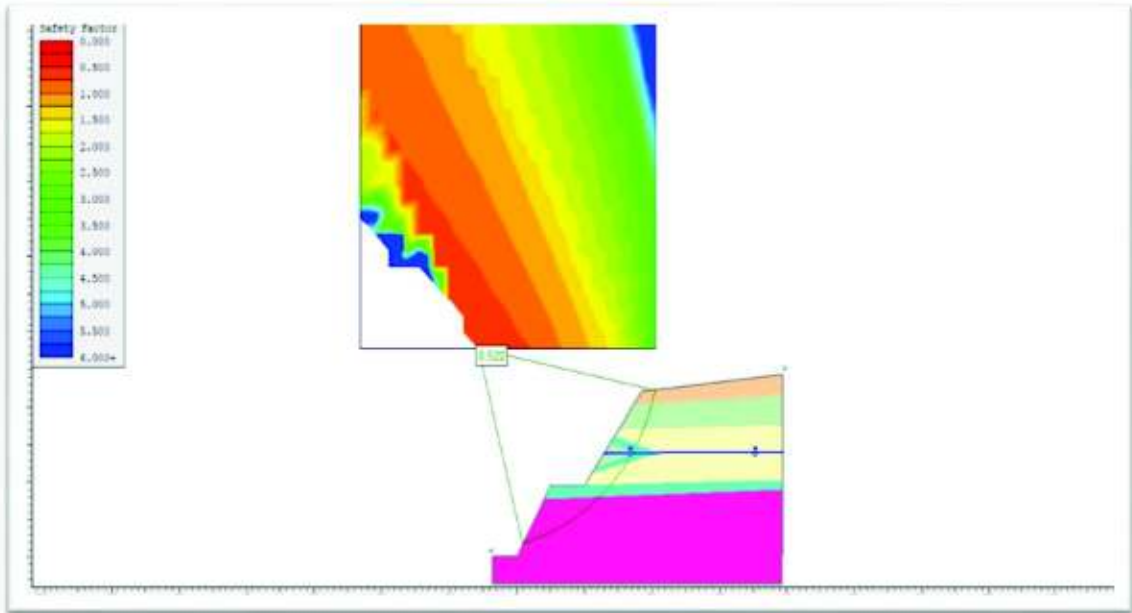


Figura 4.33 Perfil del talud D-015 sin ninguna intervención.

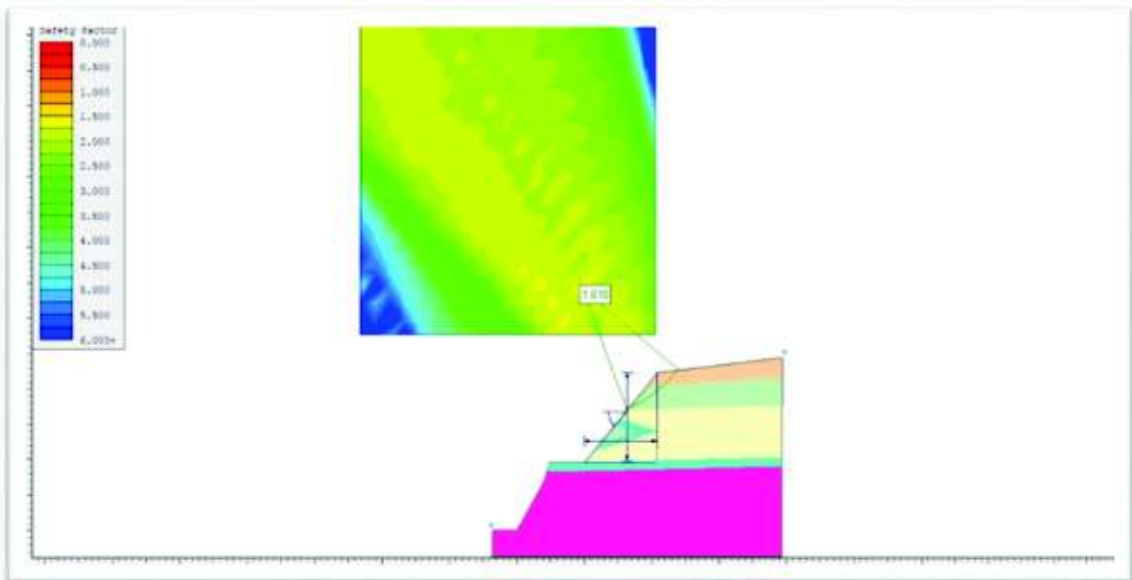


Figura 4.34 Perfil del talud D-015 aplicando métodos de protección y remediación

#### **4.8.14 Deslizamiento en 2+090 (DD-003)**

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** 07/03/2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea, árboles

**Uso de suelo:** Ganadería.

En este sitio se encuentra un talud de 9 metros de altura, donde se aprecia un movimiento tipo rotacional que principalmente ocurre en los estratos superiores del talud. (Fotografía 4.15)

En este talud el material que falla son las arcillas, por lo que se necesita diseñar un corte, para que, según las modelaciones, (Figura 4.35), el factor de seguridad se incremente de 0.22 a 1.09. El corte está diseñado desde la cota 996 hasta la cota 1115 con una inclinación de  $35^\circ$  y una berma de 3 m. (Figura 4.36). Además, se sugiere aplicar drenajes y protección con geosintéticos a las arcillas.



Fotografía 4.15 Deslizamiento DD-003. (UTM, WGS 84: 757243E; 18764N).

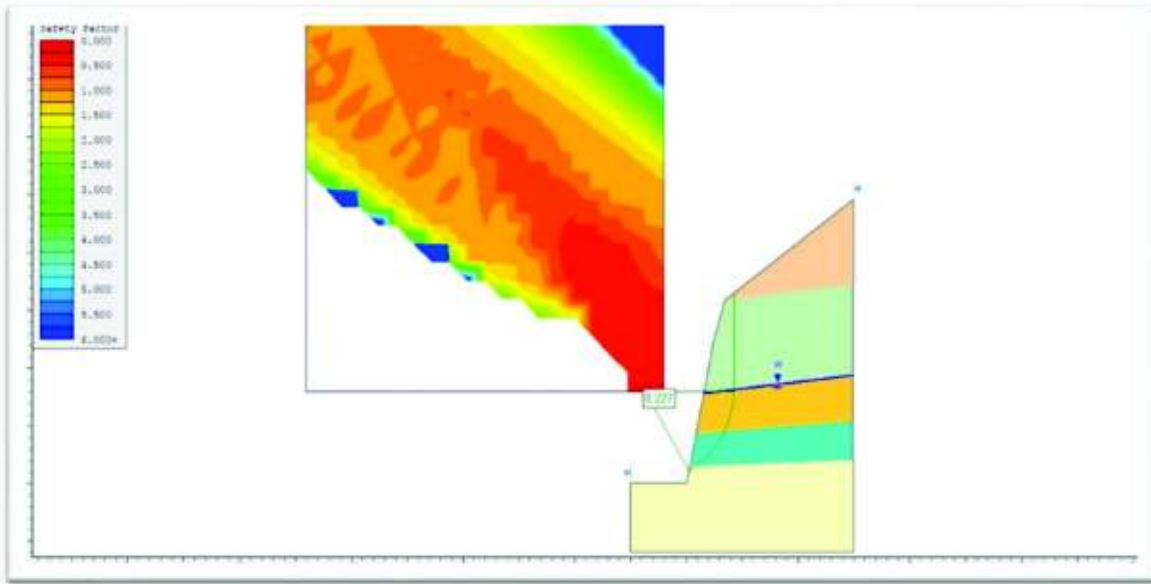


Figura 4.35 Perfil del talud DD-003 sin ninguna intervención.

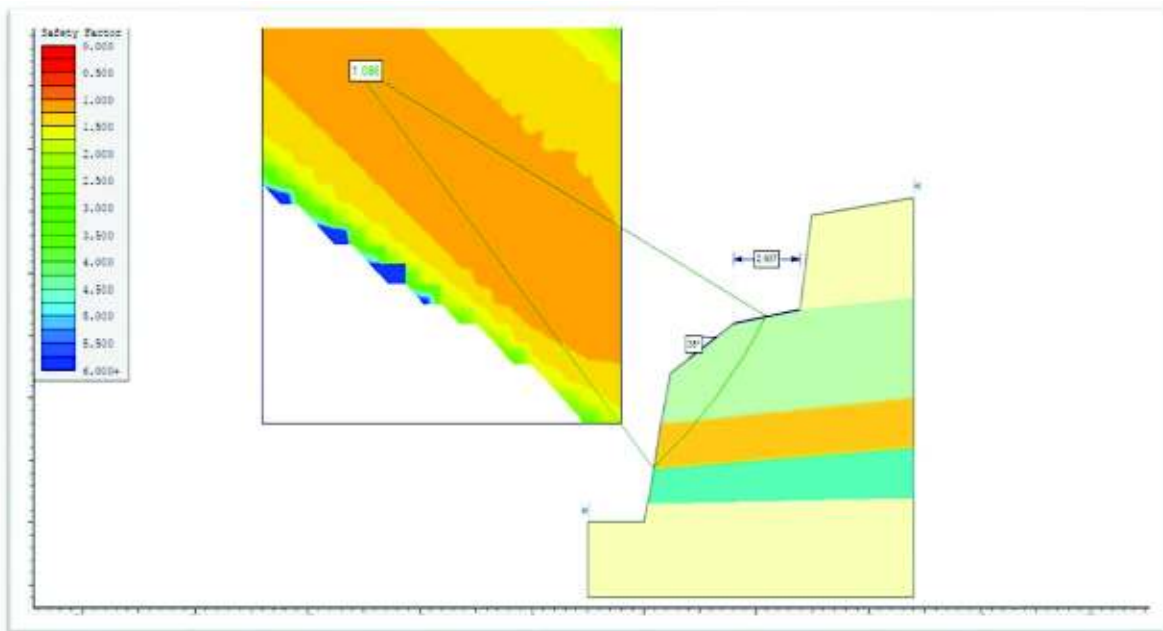


Figura 4.36 Perfil del talud DD-003 aplicando métodos de protección y remediación

#### **4.8.15 Deslizamiento en 2+170 (D-013)**

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** marzo de 2016

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Severo.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

El talud es un sitio de 19 metros de altura con una berma de 5 metros de ancho a una altura de 10 metros (Fotografía 4.16). El tipo de movimiento corresponde a una combinación entre caída de bloques y movimiento rotacional. En el lugar se ha detectado que los estratos inestables se encuentran bajo la berma, provocando caídas de bloques. Los materiales inestables en el sitio corresponden a arcillas tipo caolinitas.

Este talud genera grandes problemas, aquí las arcillas al estar expuestas al sol y agua, son afectadas y caen en forma de bloques. Al momento la inestabilidad calculada coincide con lo observado en campo con factores de seguridad menores a 1. (Figura 4.37).

Se sugiere hacer un corte en la cota 6,7 hasta la cota 11 con una inclinación de 45°, una berma de 7m desde la cota 11 hasta la cota 19 con una inclinación de 49°. Además, se recomienda aplicar subdrenes y proteger con geosintéticos. (Figura 4.38).



Fotografía 4.16 Deslizamiento D-013. (UTM, WGS 84: 757178E; 18793N).

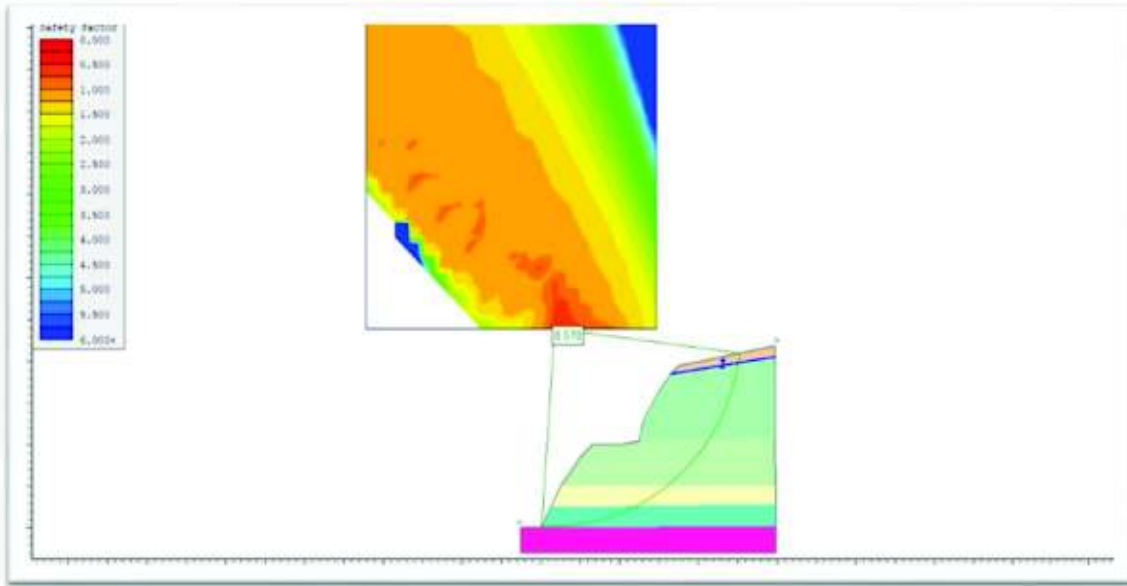


Figura 4.37 Perfil del talud D-013 sin ninguna intervención.

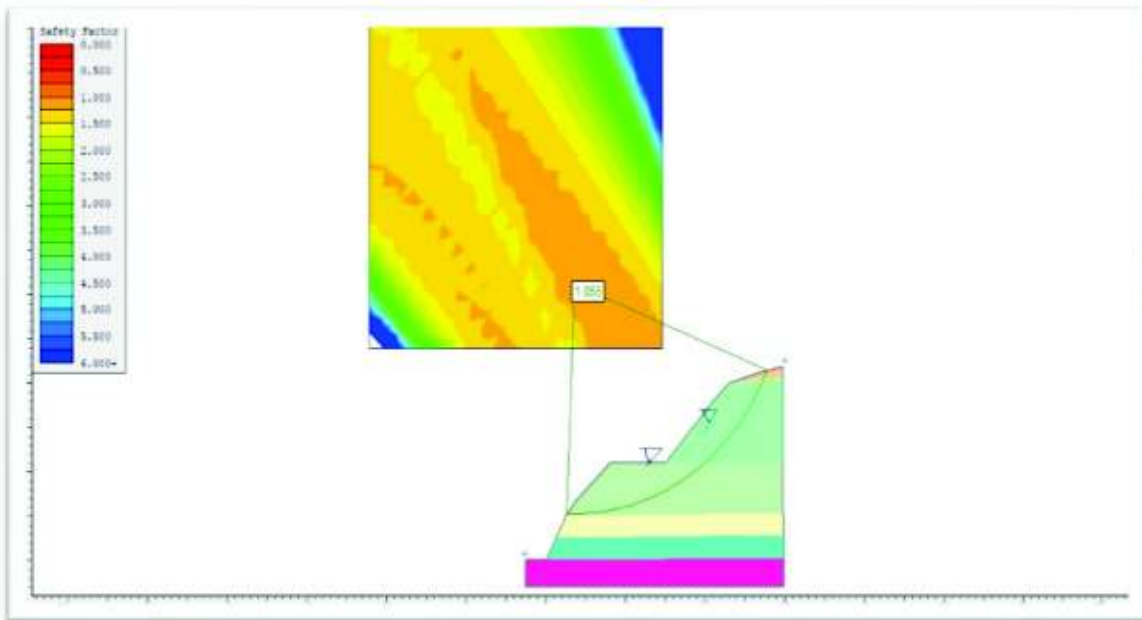


Figura 4.38 Perfil del talud D-013 aplicando métodos de protección y remediación



#### 4.8.16 Deslizamiento en 2+460 (D-006)

Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento: Julio de 2017.

Estado: Activo

Intensidad de Daño: Daño Leve.

Cobertura: Vegetación Herbácea

Uso de suelo: Ganadería.

En el sitio el corte es de 4 metros de altura con nivel de humedad alto, el tipo de fenómeno ocurrido es del tipo traslacional. (Fotografía 4.17). En las simulaciones el factor de seguridad del talud es muy bajo (Figura 4.39), sin embargo, al drenar y proteger estas capas se consigue estabilidad sin problema FS 2.5. (Figura 4.40).

Se propone proteger los estratos de arena con cunetas de coronación, y evitar la erosión del agua y viento directamente con vegetación.



Fotografía 4.17 Deslizamiento D-006. (UTM, WGS 84: 757050E; 19050N).

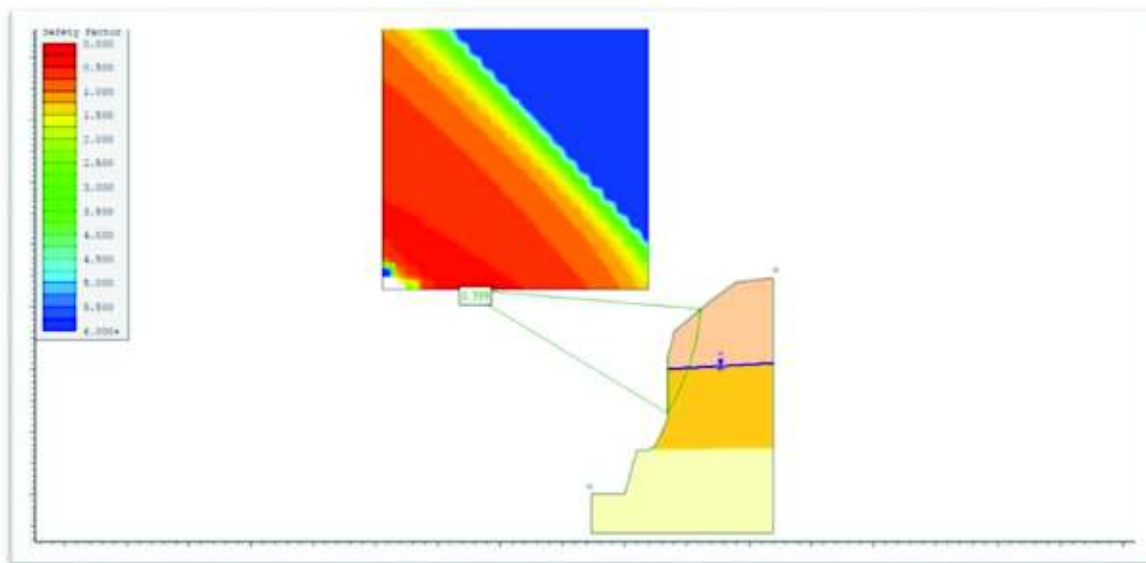


Figura 4.39 Perfil del talud D-006 sin ninguna intervención.

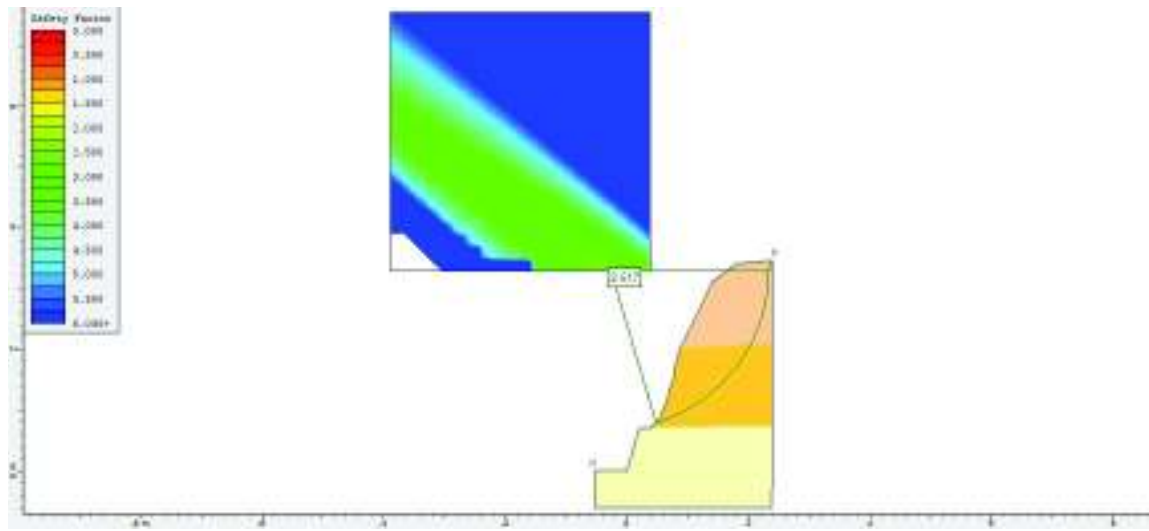


Figura 4.40 Perfil del talud D-006 aplicando métodos de protección y remediación

#### 4.8.17 Deslizamiento en 2+610 (D-007)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** Julio de 2017.

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

En este sitio el corte es de 11 metros de altura, el tipo de movimiento rotacional, los factores que provocan la inestabilidad son la desfavorable orientación de las capas y erosión. (Fotografía 4.18).

El factor de seguridad es muy bajo en la simulación, llega a ser 0,1 condicionado por la saturación de las capas (Figura 4.41).

Ya una vez considerando drenajes en la parte superior y con un corte a medio talud con una berma de 2 metros de ancho, 1H: 2V, con inclinación 60° se mejora notablemente la estabilidad con aumento en el factor de seguridad (Figura 4.42). Además, se debe considerar la construcción de cuneta en la parte superior y proteger las capas de arenas con geosintéticos.



Fotografía 4.18 Deslizamiento D-007. (UTM, WGS 84: 757151E; 19103N).

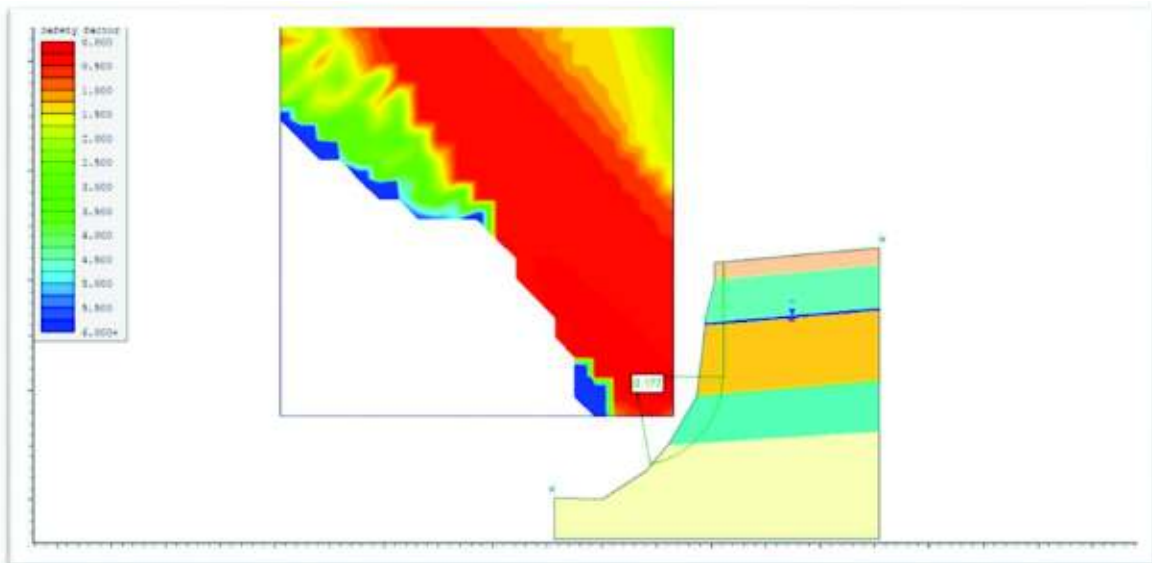


Figura 4.41 Perfil del talud D-007 sin ninguna intervención.

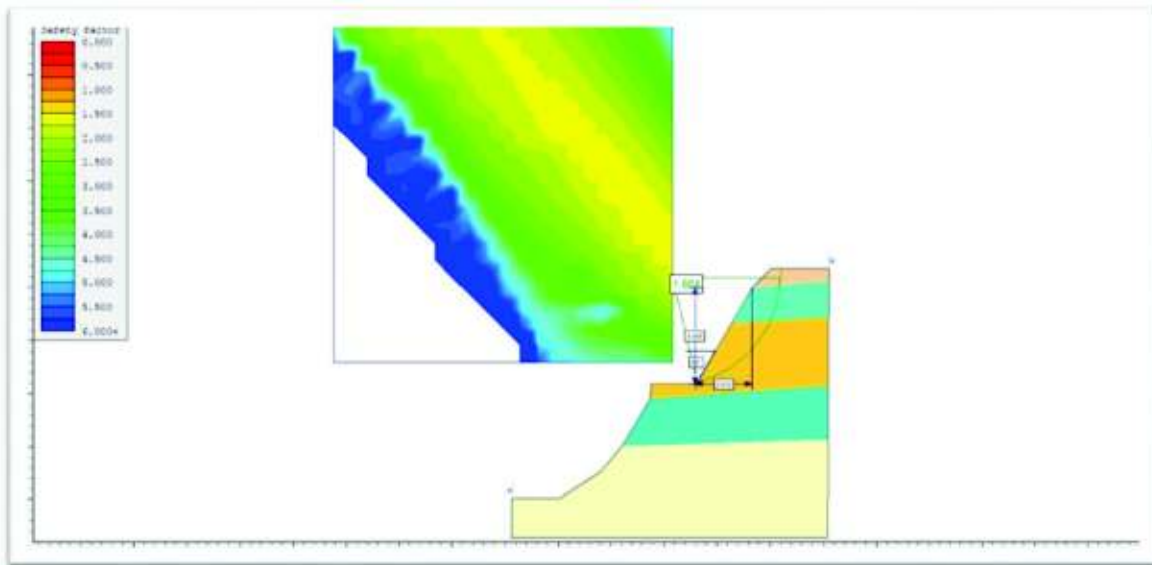


Figura 4.42 Perfil del talud D-007 aplicando métodos de protección y remediación

#### 4.8.18 Deslizamiento en 2+960 (D-008)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** mayo de 2017

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

El corte en la ladera es de 5 metros, el tipo de movimiento es rotacional que afecta principalmente a las capas superiores compuestas por arenas (Fotografía 4.19). El modelamiento del talud indica un factor de seguridad muy bajo (Figura 4.43), sin embargo, al mejorar su geometría con una berma de 2 metros de ancho a la mitad del talud incrementa su factor de seguridad, recomendado con una inclinación de 60 grados. (Figura 4.44.)

Igualmente deben protegerse los estratos de arenas con cunetas de coronación y protección directa con geosintéticos, suelo y vegetación.



Fotografía 4.19 Deslizamiento D-008. (UTM, WGS 84: 757079E; 19426N).

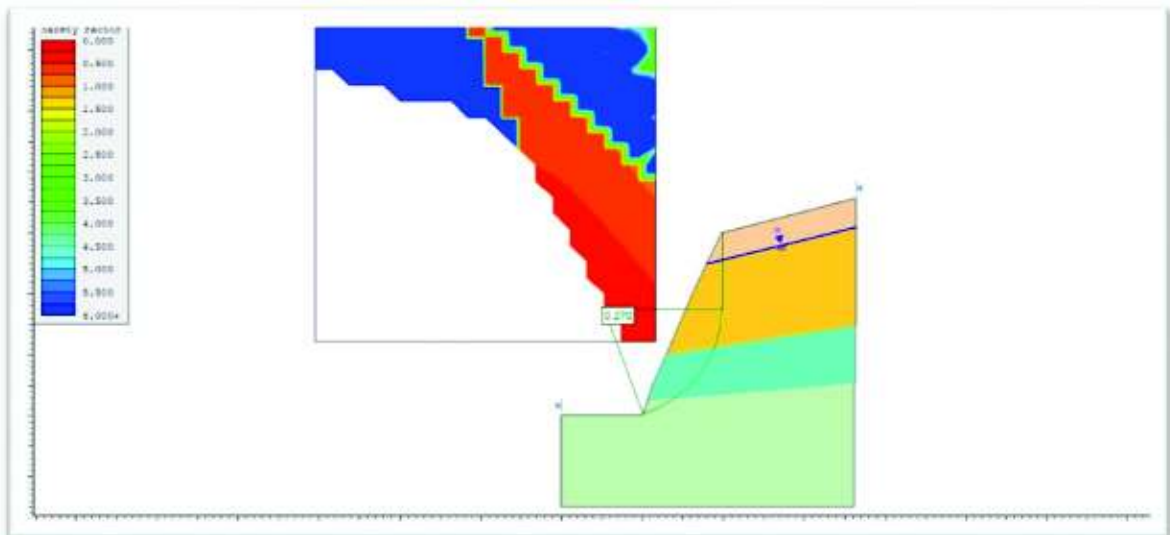


Figura 4.43 Perfil del talud D-008 sin ninguna intervención.

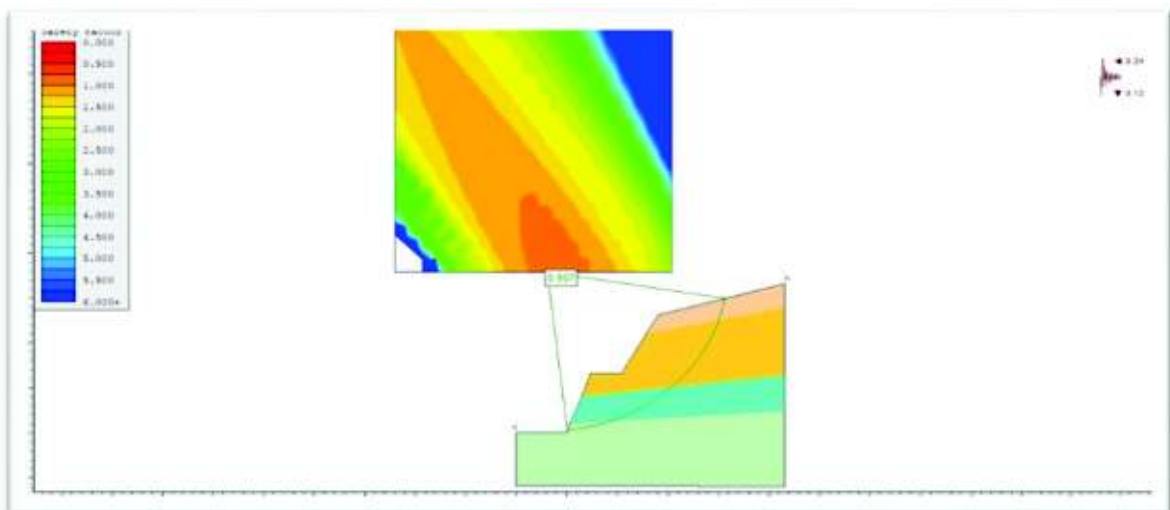


Figura 4.44 Perfil del talud D-008 aplicando métodos de protección y remediación

#### 4.8.19 Deslizamiento en 3+290 (D-009)

Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento: 26/04/2017

Estado: Activo

Intensidad de Daño: Daño Leve.

Cobertura: Vegetación Herbácea

Uso de suelo: Ganadería.

El corte del talud es de 6 metros de altura en el sitio. Se aprecia que nuevamente las arenas se desprenden por erosión. (Fotografía 4.20) Las simulaciones en este material nos indican que el talud es estable con un factor de seguridad de 1,5 lo cual mostraría que no requiere intervención (Figura 4.45), sin embargo, en campo se aprecia el efecto de la erosión notablemente, por tato es necesario proteger estos estratos con cunetas de coronación para evitar que el agua descargue directamente al talud, y protegerlo con vegetación y geosintéticos.



Fotografía 4.20 Deslizamiento D-009. (UTM, WGS 84: 757084E; 19736N).

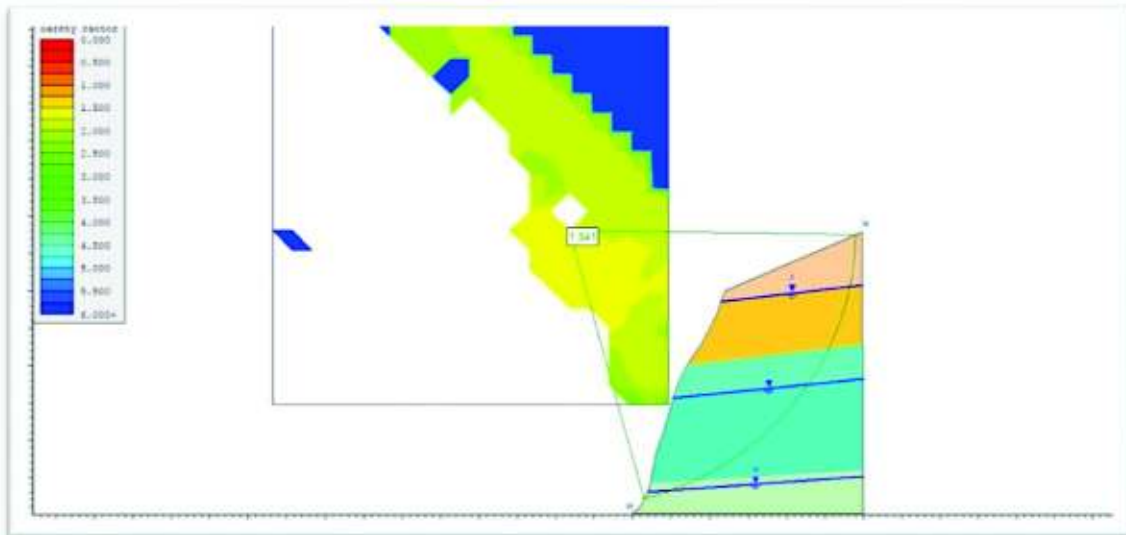


Figura 4.45 Perfil del talud D-009 sin ninguna intervención.

#### 4.8.20 Deslizamiento en curva acceso a CM (D-010)

**Fecha de Ocurrencia Primer Movimiento:** agosto de 2015

**Estado:** Activo

**Intensidad de Daño:** Daño Moderado.

**Cobertura:** Vegetación Herbácea

**Uso de suelo:** Ganadería.

El talud es de 8 metros de altura y se presenta con dos tipos de materiales que contrastan entre sí. La capa superior que corresponde a arenas es afectada por erosión directamente, lo cual hace que colapse y se desprenda como un deslizamiento traslacional (Fotografía 4.21).

El F.S calculado en el sitio es de 0,5 considerado inestable y que abarca principalmente a la capa de arenas (Figura 4.46.), sin embargo, protegiendo esta capa se mejora la estabilidad. No se pueden aplicar más medidas de remediación ya que en este lugar existen restos arqueológicos que impiden tender el talud, lo cual sería lo más apropiado.

Es necesario por tanto colocar cunetas de coronación en el sitio y evitar la erosión directa de las arenas con vegetación en el sitio o geosintéticos.



Fotografía 4.21 Deslizamiento D-010. (UTM, WGS 84: 756742E; 20178N).

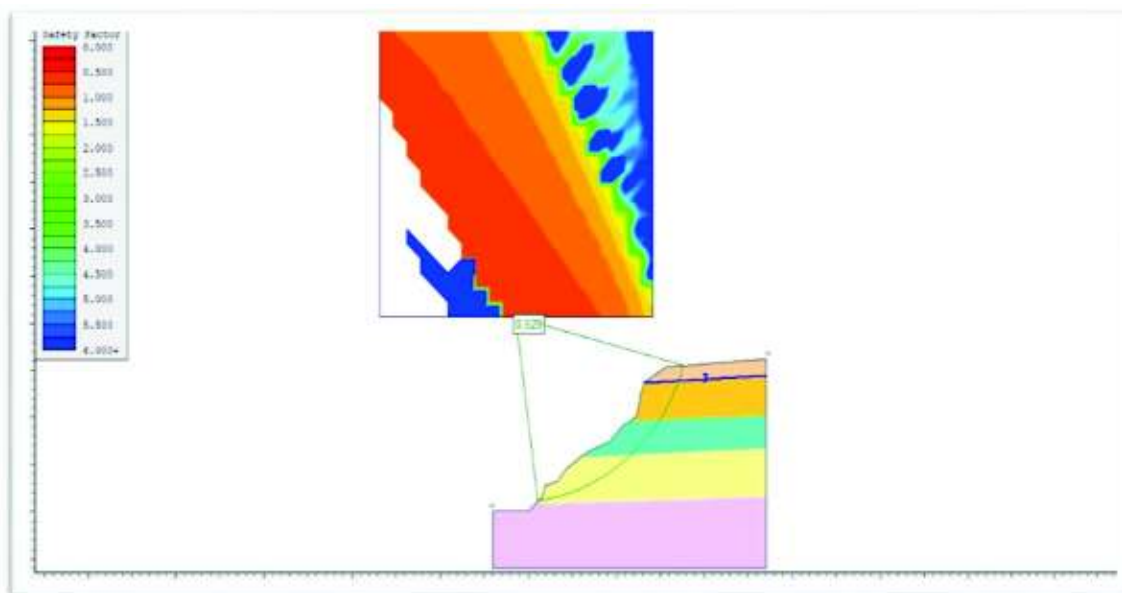


Figura 4.46 Perfil del talud D-010 sin ninguna intervención.

## 4.9 Factores de seguridad

En la tabla 4.15 se muestra un resumen de los factores de seguridad obtenidos, antes y después de las medidas de estabilización. Se muestra además un resumen de las medidas de estabilización aplicadas a cada talud.

Tabla 4.15 Estabilidad de sitios en condiciones naturales actuales

Id	Abscisa	x	y	F.S.	F.S Estable	Medida de estabilización
D11	0+150	757742	17383	3.285	3.2	No requiere intervención
D16	0+340	757594	17436	0.398	1.36	Cunetas de coronación
Dd01	0+535	757444	17596	0.498	0.998	Corte del talud, subdrenes y protección con geosintéticos
Dd04	0+630	757332	17636	3.016	3.016	Cunetas de coronación o uso de geosintéticos
Dd02	0+735	757252	17661	0.563	1.937	Cunetas de coronación y uso de geosintéticos
D01	1+126	757095	17830	0.645	4.697	Cunetas de coronación y uso de geosintéticos
D02	1+180	757106	17987	0.299	1.24	Cunetas de coronación y uso de geosintéticos
D03	1+430	757017	18195	0.697	2.182	Cunetas de coronación y uso de geosintéticos
D04	1+510	757038	18273	0.33	1.756	Cunetas de coronación
D05	1+680	757079	18441	1.37	1.55	Cunetas de coronación
D12	1+710	757083	18442	0.708	2.926	Diseño de subdrenes
D14	1+896	757203	18579	0.674	1.761	Retirar material inestable o protección con geosintéticos
D15	1+950	757224	18627	0.55	1.61	Corte del talud, subdrenes y protección con geosintéticos



Dd03	2+090	757243	18764	0.212	1.069	Corte del talud, subdrenes y protección con geosintéticos
D13	2+170	757178	18793	0.546	0.991	Corte del talud, subdrenes y protección con geosintéticos
D06	2+460	757050	19050	0.399	2.517	Cunetas de coronación
D07	2+610	757151	19103	0.131	1.604	Corte del talud, subdrenes y protección con geosintéticos
D08	2+960	757079	19426	0.179	1.242	Corte del talud y protección con geosintéticos
D09	3+290	757084	19736	1.541	1.541	Cunetas de coronación y protección con geosintéticos
D10	Cm	756742	20178	0.466	0.466	Cunetas de coronación

Dentro de las medidas de estabilización predominan las que están relacionadas con la acción del agua sobre los suelos, es decir, el diseño de cunetas de coronación, junto con la protección de los taludes con el uso de geosintéticos. En menor proporción se encuentran métodos más agresivos como son los cortes en 6 de los 20 deslizamientos.

Es importante resaltar que a pesar de las medidas aplicadas siete taludes no pudieron alcanzar el factor de seguridad dispuesto por la NEC, esto debido a situaciones relacionadas con los predios pertenecientes a personas ajenas a la constructora, dificultad de acceso al talud y costos. En estos casos el factor de seguridad modelado es el máximo que se puede alcanzar con las condiciones antes mencionadas.

En la figura 4.47 se observa la evolución del factor de seguridad en los taludes y su notable mejoría después de aplicar medidas de estabilización.

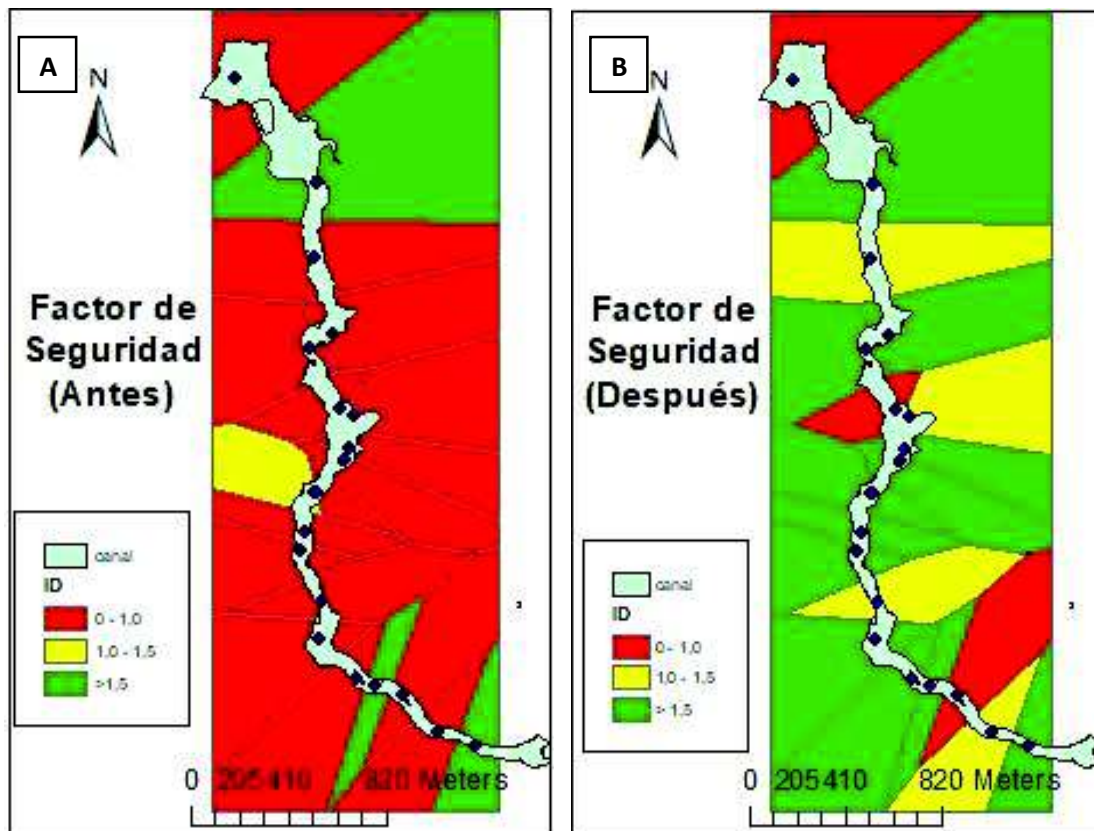


Figura 4.47 Mapa con factores de seguridad antes (figura A) y después (figura B).

Tabla 4.16 Comparación entre el análisis de susceptibilidad y el factor de seguridad obtenido.

Id	Coordenadas		Factor de seguridad inicial		Susceptibilidad
	x	y	Rango	FS	
Dd01	757444	17596	>1.5	3.285	Baja
Dd02	757252	17661	0 – 1	0.398	Baja
Dd03	757243	18764	0 – 1	0.498	Baja
D01	757095	17830	>1.5	3.016	Baja
D02	757106	17987	0 – 1	0.563	Baja
D03	757017	18195	0 – 1	0.645	Baja
D04	757038	18273	0 – 1	0.299	Baja
D05	757079	18441	0 – 1	0.697	Baja
D06	757050	19050	0 – 1	0.33	Media
D07	757151	19103	1 – 1.5	1.37	Baja
D08	757079	19426	0 – 1	0.708	Media
D09	757084	19736	0 – 1	0.674	Media
D10	756742	20178	0 – 1	0.55	Media
D11	757742	17383	0 – 1	0.212	Baja
D12	757083	18442	0 – 1	0.546	Baja
D13	757178	18793	0 – 1	0.399	Baja
D14	757203	18579	0 – 1	0.131	Baja
D15	757224	18627	0 – 1	0.179	Baja
D16	757594	17436	>1.5	1.541	Baja
Dd04	757332	17636	0 – 1	0.466	Baja

Al realizar una comparación entre el factor de seguridad inicial y la susceptibilidad alcanzada (tabla 4.16), tomando en cuenta que los dos parámetros están divididos en tres categorías, es decir: susceptibilidad baja, media y alta; y el factor de seguridad a su vez dividido en tres rangos 0 – 1, 1 – 1.5 y > 1.5; se puede señalar que muestran una notable discordancia entre estos factores, situación que se puede explicar al tomar en cuenta que la susceptibilidad toma rangos muy grandes de los factores analizados (pendiente, litología, contenido de agua, propiedades geomecánicas) lo cual genera un alto rango de incertidumbre; mientras que el factor de seguridad es un valor obtenido al analizar de manera más individualizada para cada talud los factores geológicos y geotécnicos, por ejemplo siguiendo las metodologías de división en rebanadas con características geomecánicas y geométricas resistentes individuales para cada una de ellas (métodos Janbú, Spencer, Bishop).

## **CAPITULO V**

### **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

A partir del análisis de las características geomecánicas de los materiales como la granulometría, cohesión, ángulo de fricción y plasticidad, se pudo clasificar los materiales en tres unidades geotécnicas, MH; SM, ML, las cuales representan una susceptibilidad baja a media.

Durante el estudio de los 20 deslizamientos ocurridos a lo largo del canal, se determinó que los principales factores de inestabilidad están relacionados al comportamiento geomecánico y humedad del terreno. Otros factores que también influyen en la inestabilidad son la pendiente, litología, erosión y el deficiente sistema de drenaje.

La pendiente no parece ser un factor decisivo para la inestabilidad del lugar, esto puede estar relacionado al hecho de que, a pesar que se usó un DEM de 4m de resolución, el mapa de pendientes muestra la terraza en la que está construida el canal, y no la pendiente actual producto de las excavaciones generadas para la construcción del canal de conducción de agua de la hidroeléctrica.

De los 20 deslizamientos estudiados, al realizar las simulaciones para cada uno en condiciones naturales, es decir sin medidas de estabilización, solamente tres mostraron condiciones de estabilidad con factores de seguridad mayores a los establecidos por la NEC.

Los tipos de deslizamientos que predominan son los del tipo rotacional donde los materiales que fallan son los del tipo arenas que generalmente se encuentran en capas inclinadas a favor de la pendiente; los siguen los deslizamientos del tipo traslacional donde también fallan las arenas; y finalmente están los fenómenos de remoción en masa tipo caída donde los materiales que fallan son las arcillas las cuales absorben gran cantidad de agua en las temporadas de lluvia y en temporadas secas tienden a formar grietas y caer en forma de bloques.

Los 17 taludes restantes mostraron tener un factor de seguridad por debajo de lo aceptado por la NEC, a los cuales se les aplicó diferentes medidas de estabilidad como disminución de la erosión, evitar la saturación de agua, drenaje de niveles freáticos y modificaciones en el diseño del talud; lo que finalmente permitió alcanzar la estabilidad en ellos. A pesar de todas las medidas aplicadas, 7 taludes no pudieron ser estabilizados debido a situaciones relacionadas con los terrenos aledaños al canal de conducción de agua y que pertenecen a otras personas ajenas a la constructora, además de requerir medidas de estabilización más costosas.

Las maneras más óptimas para reducir las fuerzas actuantes e incrementar las fuerzas resistentes en los taludes de la zona de trabajo, están relacionadas a la excavación de materiales en un sector apropiado del talud para eliminar estratos débiles o zonas potenciales de falla, la construcción de drenajes para reducir las presiones hidrostáticas en incrementar la resistencia de los materiales, y el uso de geosintéticos para evitar la erosión e impulsar el crecimiento de vegetación en la zona.

Es importante resaltar que los geosintéticos son medidas de revestimiento que ayudan a proteger al talud, y no medidas estabilizadoras como tal, por lo que se deben aplicar en taludes que ya son estables.

## **5.2 Recomendaciones**

Es importante realizar siempre un estudio de estabilidad de taludes previo a la ejecución de cualquier obra civil, ya que esto puede evitar acciones más complicadas e inversión de mayores cantidades de dinero, que si se realizara el estudio antes.

Se recomienda el diseño y construcción de las cunetas de coronación lo más pronto posible para evitar la saturación de los suelos con agua, ya que esta es el principal problema de estabilización.

Las muestras para los ensayos de laboratorio fueron tomadas en campo durante la temporada de invierno, mostrando materiales muy saturados en agua, debido a las lluvias propias de la temporada. Es importante destacar esto ya que, los mismos suelos durante el verano muestran características totalmente diferentes haciendo los resultados puedan variar, por lo que se recomienda hacer un estudio que abarque las muestras para ambas condiciones.

Para el presente estudio se realizó una campaña de recolección de muestras en campo que incluye 17 muestras para ensayos de corte directo y 15 muestras para ensayos S.U.C.S, al aplicar el método de interpolación Kriging e interpretar los datos se convirtió en un trabajo conflictivo y complicado por lo que se recomienda tener un catálogo con el mayor número de muestras posible para evitar esta situación y que los resultados sean más fáciles de analizar.

La comparación entre análisis de susceptibilidad y factores de seguridad iniciales muestra una notable oposición entre ambos parámetros, al determinar que un sitio presenta baja susceptibilidad a deslizamientos, pero un bajo factor de seguridad. Por lo que se recomienda tomar al análisis de susceptibilidad como un estudio de prefactibilidad para una escala regional, y no debe tomarse en cuenta para estudios ingenieriles locales; para ello es adecuado trabajar con los factores de seguridad obtenidos en cada talud a partir de factores geológicos y geotécnicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Boland, M., Pilatasig, L. Ibadango, Elías., Mc Court, William., Aspden, J., Hughes, R., Beate, B. (2000). *Geology of the Cordillera Occidental de Ecuador entre 0°00' and 1°00'N*. CODIGEM – British Geological Survey. Report X. 27 – 29.
- Carrera, S., Carlosama, F. (2017). *Análisis del Peligro por Fenómenos de Remoción en Masa en los Taludes de un Tramo de la Quebrada Shanshayacu, Zona Quitumbe, Distrito Metropolitano de Quito. Proyecto de Titulación, EPN*. 23 – 107.
- Catanzariti, F. (nd). *Estabilidad de Taludes*. GeoStru. Recuperado de <https://www.geostru.eu/es/estabilidad-de-taludes>. (2016).
- Crespo, C., (2010). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México DF, México. Sexta edición. Limusa.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México DF, México Cuarta edición. Thomson Learning.
- Eguez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, Michael., Costa, Carlos., Dart, Richard., Bradley, L. (2003). *Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Ecuador and its offshore regions*. USGS, 26 – 28.
- Flentje, Phillip. N., Miner, Anthony., Whitt, Graham., Fell, Robin. (2007). *Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning*. Australian Geomechanics Journal, 42 (1), 13-36.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España. Primera edición. Pearson Education.
- Gutiérrez, L. Alfonso., Ramírez, Aldo., Lebel, Thierry., Santillán, Oscar., Fuentes, Carlos., (2011). *El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de mediciones hidrológicas*. Revista de Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía. 194 – 201.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2015). *Anuario meteorológico n° 52-2012*, 17-21.
- Koerner, Robert. M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. Estados Unidos. Sexta edición, volumen 1. Xlibris.
- Mora, R., Chaves, J., Vásquez, M. (2002). *Zonificación de la Susceptibilidad al Deslizamiento: resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del Método Mora-Vahrson (Mora, R. et al, 1992)*. Revista Geológica de América Central. 19 – 24.
- NEC, *Norma Ecuatoriana de la Construcción, Geotecnia y Cimentaciones*, (2014). 18 – 29.

- Núñez, C., (2011). *Geología del Cuaternario y Geomorfología Tectónica entre Villadora y Bellavista, río Guayllabamba, Proyecto de Titulación, EPN*. 13 – 78.
- PMA. Proyecto Multinacional Andino: Geociencia para las Comunidades Andinas. (2009). *Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional No. 7. 3 – 9.
- PMA. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la Evaluación de Amenazas*. Publicación Geológica Multinacional No. 4.
- Rocscience Inc. (2002). *User's Guide. 2D limit equilibrium slope stability for soil and rocks slopes*. Slide. 38 – 117.
- Sanhueza, P. C., Rodríguez. C. L., (2013). *Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales*. Revista de la Construcción. Vol. 12. Chile. 3 – 44.
- Shroder, J, F. (2014). *Landslide hazards, risk and disasters*. Estados Unidos. Elsevier.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga – Colombia. Publicaciones UIS.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis Geotécnico*. Tomo 1. Bucaramanga – Colombia. Publicaciones UIS.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Técnicas de remediación*. Tomo 2. Bucaramanga – Colombia. Publicaciones UIS.
- Vallejo, C., (2007). Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous – Paleogeno). Research Gate. 31-32,78- 79.

## **6 ANEXOS**

### **6.1 Anexo I. Ensayos Geomecánicos**