



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**Aplicación de métodos probabilísticos a la estabilidad de
taludes, considerando reforzamiento del talud con
geosintético**

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

Autor: Bustamante Cuenca, Emily Verónica

Director: Esparza Villalba, Carmen Antonieta

LOJA

2022



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2022

Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular

Loja, 16 de febrero de 2022

Magíster

Belizario Amador Zarate Torres

Director de la carrera de Ingeniería Civil

Ciudad.-

De mi consideración:

El presente Trabajo de Integración Curricular denominado: Aplicación de métodos probabilísticos a la estabilidad de taludes, considerando reforzamiento del talud con geosintético, realizado por Emily Verónica Bustamante Cuenca, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Integración Curricular ha sido revisado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y no cuenta con porcentaje de coincidencia alguno.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Carmen Antonieta Esparza Villalba

C.I.:1711238713

Correo electrónico: caesparza@utpl.edu.ec

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Emily Verónica Bustamante Cuenca, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor (a) del Trabajo de Integración Curricular denominado: Análisis de métodos probabilísticos a la estabilidad de taludes, considerando reforzamiento del talud con geosintético, de la carrera de Ingeniería Civil, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1. Materiales y Métodos, Capítulo 2. Análisis de Resultados y Conclusiones, siendo Carmen Antonieta Esparza Villalba, director (a) del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad", en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....

Autor: Emily Verónica Bustamante Cuenca

C.I.: 1105151631

Correo electrónico: evbustamante1@utpl.edu.ec

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a Dios por guiarme día a día, a mis padres Juan Bustamante y Verónica Cuenca, que son el pilar fundamental de mi vida, a mis hermanos y cuñado Juan Andrés, Magaly y Eduardo por ser el apoyo incondicional en mi preparación a la vida profesional motivándome cada día a ser mejor y seguir adelante y a mis sobrinas Bryhanna y Ainhoa, por ser luz y amor en mi vida.

Agradecimiento

A lo largo de mi vida he tenido la oportunidad de crecer y contar con muchas personas que han aportado a mi vida, a mi crecimiento personal y profesional. Agradezco a Dios por tenerme con salud y vida para culminar mis estudios; a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y confianza en mí. De la misma manera quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Ing. Carmen Esparza, docente que me ha formado en varios ciclos académicos y me ha brindado su dirección en el desarrollo del trabajo de titulación que con su experiencia profesional y tiempo he logrado culminar la investigación. Y como olvidar a mis compañeros de carrera, a mis amigos con quienes hemos construido un camino de bien, todos los momentos compartidos me llenan el alma de alegría y los llevaré siempre en mi memoria.

Índice de contenido

Carátula	I
Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular	II
Declaración de autoría y cesión de derechos	III
Dedicatoria	V
Agradecimiento	VI
Índice de contenido	VII
Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Capítulo uno	6
Materiales y Métodos	6
1.1 Zona de Estudio	6
1.1.1 Ubicación	6
1.1.2 Clima	7
1.1.3 Litología	7
1.2 Datos y Materiales	8
1.3 Metodología	11
1.3.1 Generación de Modelos Geotécnicos	11
1.3.2 Análisis determinístico de estabilidad de talud	13
1.3.3 Análisis probabilístico de estabilidad de talud	14
Capítulo dos	16
Análisis de Resultados	16
2.1 Análisis de estabilidad en condiciones actuales	16
2.1.1 Métodos determinísticos: equilibrio límite	18
2.1.2 Perfil crítico	20
2.2 Análisis de estabilidad según Monte Carlo	21
2.2.1 Generación de valores aleatorios	22
2.3 Medidas de mitigación	24

2.3.1	Análisis de estabilidad con geosintéticos	26
2.4	Análisis de Resultados	26
2.4.1	Factor de Seguridad	27
2.4.2	Índice de confiabilidad y probabilidad de falla	29
	Conclusiones	31
	Recomendaciones	33
	Referencias	34

Índice de tablas

Tabla 1.	<i>Propiedades de los suelos localizados en el talud</i>	8
Tabla 2.	<i>Coordenadas de los perfiles del talud</i>	12
Tabla 3.	<i>Factores de seguridad: método determinístico</i>	18
Tabla 4.	<i>Factores de seguridad: método determinístico</i>	18
Tabla 5.	<i>Factores de seguridad: método determinístico con sismo</i>	19
Tabla 6.	<i>Factores de seguridad: método determinístico con sismo</i>	19
Tabla 7.	<i>Valores típicos de cohesión y ángulo de fricción</i>	22
Tabla 8.	<i>Valores de desviación estándar para los suelos presentes</i>	22
Tabla 9.	<i>Combinaciones aleatorias para cohesión y ángulo de fricción</i>	23
Tabla 10.	<i>Factores de seguridad: método Monte Carlo</i>	23
Tabla 11.	<i>Resumen combinación 10</i>	24
Tabla 12.	<i>Valores típicos para material de relleno granular</i>	26
Tabla 13.	<i>Especificaciones geomalla</i>	26
Tabla 14.	<i>Resultados análisis probabilístico</i>	30

Índice de figuras

Figura 1.	<i>Ubicación del área de estudio</i>	6
Figura 2.	<i>Talud en el área de estudio</i>	7
Figura 3.	<i>Falla del talud en el área de estudio</i>	10

Figura 4. <i>Mapa zonas sísmicas en Ecuador</i>	11
Figura 5. <i>Geometría del perfil 2</i>	12
Figura 6. <i>Superficie de falla del perfil 1</i>	13
Figura 7. <i>Flujograma proceso de análisis método Monte Carlo</i>	14
Figura 8. <i>Perfil 1</i>	16
Figura 9. <i>Perfil 2</i>	17
Figura 10. <i>Perfil 3</i>	17
Figura 11. <i>Superficie de falla del perfil 3</i>	20
Figura 12. <i>Superficie de falla del perfil 3: método de Janbú</i>	21
Figura 13. <i>Nueva geometría para el perfil 3</i>	25
Figura 14. <i>Medida de mitigación para perfil 3</i>	27
Figura 15. <i>Variación de FS en condiciones actuales y com medida de mitigación</i>	28
Figura 16. <i>Círculo de falla perfil 3 con medida de mitigación</i>	29
Figura 17. <i>Círculo de falla perfil 3 con sismo y medida de mitigación</i>	30

Resumen

En el análisis de estabilidad de taludes existen dos metodologías que permiten analizar este campo, como lo son los métodos determinísticos y probabilísticos. Los métodos determinísticos no son suficientemente eficientes debido a sus limitaciones en la variabilidad e incertidumbre de los parámetros geomecánicos, por lo que a menudo son reemplazados por métodos probabilísticos. El presente trabajo investiga la estabilidad de taludes en la vía de Integración barrial de la ciudad de Loja, considerando el análisis probabilístico sometido a equilibrio límite. El desarrollo de la investigación comprende la caracterización geomecánica de los estratos de suelo en dos escenarios para la generación de valores de factores de seguridad mediante la metodología de Janbú y después utilizando la variabilidad de cohesión y ángulo de fricción aplicando la metodología de Monte Carlo sobre un modelo digital generado en el software de Rocscience. La evaluación probabilística permitió determinar el grado de inestabilidad del talud, con el cual se planteó una medida de mitigación mediante el reforzamiento de talud con geosintéticos, considerando geomallas tipo UX se obtienen valores mayores de FS que representan una estabilidad aceptable.

Palabras clave: Estabilidad de taludes, análisis probabilístico, geosintéticos.

Abstract

In the analysis of slope stability there are two methodologies that allow analyzing this field, such as the deterministic and probabilistic methods. Deterministic methods are not sufficiently effective due to their limitations in the variability and unreliable of geomechanical parameters, so they are often replaced by probabilistic methods. The present investigation studies the stability of slopes in the side road of the city of Loja, considering the probabilistic analysis subjected to limit equilibrium. The development of the research includes the geomechanical characterization of the soils in two stages for the generation of safety factor values using the Janbú methodology and then using the variability of cohesion and friction angle applying the Monte Carlo methodology on a digital model generated in Rocscience software. The probabilistic evaluation allowed to determine the degree of instability of the slope, for this a mitigation measure was proposed by reinforcing the slope with geosynthetics, considering UX geogrids type higher values of FS are obtained that represent an acceptable stability.

Keywords: Slope stability, probabilistic analysis, geosynthetics.

Introducción

Uno de los principales campos de la ingeniería Geotécnica es el estudio de la estabilidad de taludes al ser evaluado mediante un factor de seguridad (FS) en el cual intervienen variables geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas (Alejandro, 2016). La estabilidad de un talud se ve comprometida debido al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas, es decir las fuerzas resistentes o estabilizadoras son superadas por las fuerzas desestabilizadoras (Orellana, 2017). En el mundo ingenieril, los taludes cumplen un papel fundamental, ya sea en la construcción de vías, edificaciones o puentes, por ende la inestabilidad de los mismos es actualmente uno de los problemas más grandes, debido a factores naturales como el cambio climático, su naturaleza, estructura, estratigrafía, condiciones de meteorización, erosión, y un sin número de factores externos como la topografía de la zona, sismicidad y la intervención humana (Reyes, 2019).

En datos presentados por la OEA se menciona que el 90% de pérdidas por deslizamientos pueden no ocurrir si se determina la causa principal mediante estudios de susceptibilidad (Jiménez, 2015). En el Ecuador la inestabilidad de taludes se encuentra muy presente especialmente en la serranía, por sus zonas montañosas las cuales son susceptibles a problemas de deslizamientos debido a la influencia de la topografía, sismicidad, meteorización y la presencia de lluvias intensas durante la mayor parte del año (M. Sánchez, 2009). Para el diseño y construcción en el país se deben emplear normativas establecidas, por lo cual la Normativa Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo de Geotecnia y Cimentaciones (NEC-SE-GC) establece valores mínimos de factores de seguridad (FS) de acuerdo a las características y especificaciones del talud (NEC, 2014).

A lo largo de los años se han desarrollado varios métodos y técnicas aplicables a la estabilización de taludes, en donde la mayoría se basa en principios de equilibrio límite, dividiéndose en dos grandes métodos: determinísticos y probabilísticos (Albarracín, 2020). Los métodos probabilísticos determinan la confiabilidad de un talud según el cálculo de la probabilidad de falla e índice de confiabilidad, correspondientes a la superficie de

deslizamiento crítica, entre los métodos se encuentran: las series de aproximación de Taylor, Método de Montecarlo y método de Rosenblueth (Hidalgo Montoya & Pacheco de Assis, 2011). Al evaluar la estabilidad de taludes mediante los distintos métodos, muchas veces los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna no satisfacen los requerimientos solicitados, por ende se han buscado soluciones que brinden seguridad y ahorren tiempo y dinero (Jiménez, 2006).

Las soluciones o medidas de mitigación más comunes son los muros de contención, habitualmente se considera la colocación de muros por gravedad debido a su capacidad de absorber las presiones horizontales (Instituto Nacional de Vías, 1998). Gracias al desarrollo e innovación se ha visto la necesidad de emplear nuevas soluciones en las que destaca el uso de geosintéticos, clasificados en geotextiles y geomallas cuyo uso se presenta en distintas aplicaciones de refuerzo dando lugar a un referente económico y adaptable a las condiciones y características del talud (Jiménez, 2006).

La presente investigación se centró en los métodos probabilísticos para analizar la estabilidad de un talud aplicando las distintas variables considerando equilibrio límite con empleo de geosintéticos, se tomó como caso de estudio la vía de Integración Barrial, ubicada al sur occidente en dirección a la vía Loja – Malacatos. La geología de la zona de estudio se encuentra principalmente conformada por rocas metamórficas y conglomerados con matriz areno arcillosa (Jumbo, 2012). Se generaron modelos matemáticos del talud considerando perfiles topográficos y propiedades geomecánicas (características de los materiales que conforman el talud) para proponer una solución de mitigación viable, económica y segura para el talud en la zona de estudio.

El objetivo general del trabajo es evaluar la estabilidad de un talud reforzado mediante geosintéticos, considerando métodos probabilísticos frente a equilibrio límite, el cual se desarrollara en base a objetivos específicos como: evaluar las sollicitaciones de resistencia de un talud reforzado con geosintéticos, modelar el talud de la zona de estudio con el uso de software geotécnico especializado mediante equilibrio límite, por último, analizar los

resultados de estabilidad mediante un método probabilístico frente a equilibrio límite. Por lo cual se ha planteado la siguiente hipótesis: Los parámetros de resistencia frente a equilibrio límite con reforzamiento de geosintéticos ayudan a la estabilidad del talud ubicado en la vía de integración barrial de la ciudad de Loja.

Los resultados del análisis de estabilización del talud y factores de seguridad determinados se basan sobre la compilación de información litológica de la zona de estudio, por lo tanto, el trabajo se remarca como netamente investigativo, debido a la falta de ensayos de campo y laboratorio de los suelos que conforman la zona de estudio.

El presente documento consta de dos capítulos: el primer capítulo muestra los materiales y métodos, incluye la metodología empleada para la elaboración y análisis de este trabajo, el cual especifica el proceso de recopilación y modelación. El segundo capítulo contiene los resultados obtenidos de la aplicación del método probabilístico sometido a equilibrio límite sin reforzamiento y con reforzamiento con geosintético en base al modelado, y finalmente las conclusiones y recomendaciones determinadas en la presente investigación.

Capítulo uno

Materiales y Métodos

1.1 Zona de Estudio

Las vías que conectan la ciudad de Loja se encuentran afectadas por diversos deslizamientos de tierra y pérdida de vía, debido a la falta de estudios geológicos y geotécnicos que permitan una adecuada construcción vial (Cueva, 2017). Al centrarse en la ciudad de Loja, la vía con mayor afectación a dichos problemas es la vía de integración barrial o paso lateral existen 15 puntos críticos de los cuales se ha considerado para el estudio uno entre los más críticos, los problemas son más persistentes en épocas de fuertes lluvias (Diario La Hora, 2020).

1.1.1 Ubicación

La vía de integración barrial o paso lateral atraviesa la ciudad en dirección norte - sur con una longitud de 17.80 Km, iniciando en el barrio Motupe y finaliza en la intersección con la carretera Loja – Malacatos (Cueva, 2017). Al sur occidente cerca a la intersección de la vía Loja – Malacatos, se encuentra determinada el área de estudio (figura 1). El talud se encuentra ubicado entre las abscisas 16+400.00 a la 16+500.00, con coordenadas UTM WGS84 9552720S – 699875E (figura 2).

Figura 1

Imagen de la ubicación de el área de estudio



Nota. Adaptado de Google Earth, 2015. [Fotografía], por El autor, 2022.

Figura 2

Imagen del talud en el área de estudio



Nota. [Fotografía], por El autor, 2021.

1.1.2 Clima

La ciudad de Loja se encuentra situada a una altura de 2100 m.s.n.m, con un clima temperado ecuatorial semi- húmedo, siendo originarios del mismo los factores principales que afectan a la región andina, es decir la zona de convergencia intertropical (ZCIT), caracterizada por la interacción oceánico pacífico – atmósfera y la cobertura vegetal, en términos más generales latitud y relieve (Municipio de Loja, 2014).

La temperatura media es de 16°C, la presencia de lluvias con mayor incidencia inician en el mes de octubre y finalizan en el mes de mayo cuentan con precipitaciones que varían entre 500mm a 2000mm, siendo la precipitación media de 900 mm (Municipio de Loja, 2014).

1.1.3 Litología

La ciudad de Loja se caracteriza por ser de terreno montañoso, cuya cota se halla a 2100 msnm, en donde las pendientes máximas redundan entre 40% – 70% lo que corresponde a una pendiente fuerte (Municipio de Loja, 2014). En cuanto a la geología de la ciudad se encuentra representada por rocas metamórficas y volcánicas conformadas por cuerpos graníticos y sedimentarios (Jumbo, 2012).

La geología de la zona de estudio se centra principalmente en la formación San Quillillaco constituida por rocas metamórficas, conglomerados con matriz arcillosa y estratos de suelos arcillosos y algunos depósitos limo arenosos, de color café claro, ligeramente plásticos, algo consistente a consistente, y secos (Cueva, 2017). Los suelos presentes cuentan con componentes de cuarcita y esquistos sercíticos, en la superficie se encuentran arcillas de baja plasticidad tipo CL y en la profundidad se detectan gravas con finos (GW) (Acosta, 2014).

1.2 Datos y Materiales

Para el análisis de estabilidad, los parámetros y características geomecánicas del suelo son fundamentales en la modelación e investigación, por lo que para la presente investigación se tomó como base la síntesis de los estudios realizados en la zona, considerando la resistividad eléctrica y sísmica de refracción.

Los resultados recopilados del estudio para la investigación son sobre la base de sondeos eléctricos verticales (Quezada, 2015), cortes geoelectrónicos ubicados apropiadamente para la obtención de perfiles basados en la correlación de resistividades mediante ensayos y tablas de referencia que indican la velocidad sísmica según el tipo de suelo (Acosta, 2014). En la tabla 1 proporciona un resumen de los materiales presentes en el talud.

Tabla 1

Propiedades de los suelos localizados en el talud

Características Geológicas	Suelos		
	Suelo 1 (Conglomerado)	Suelo 2 (Limo)	Suelo 3 (Arcilla)
Peso específico (kN/m ³)	19	17	16.7
Peso específico saturado (kN/m ³)	21	19	18
Cohesión (kPa)	137	12	73
Ángulo de fricción (°)	37	22	6
Coefficiente de Poisson	0.4	0.3	0.35

Tabla 1 (Continuación)

Características Geológicas	Suelos		
	Suelo 1 (Conglomerado)	Suelo 2 (Limo)	Suelo 3 (Arcilla)
Módulo de Young (kPa)	350000	12000	5000
Parámetro hidráulico ks (m/s)	1.1E-5	1.2E-9	1.2E-10

Nota. En esta tabla se presentan los diferentes parámetros de resistencia de los suelos.

Para analizar la inestabilidad de taludes es primordial conocer la superficie de falla crítica y la dirección del movimiento del talud (Albarracín, 2020). Asimismo definir el estado tensional del suelo porque en él se generan esfuerzos normales y tangenciales, los cuales al sobrepasar su valor límite dan lugar al fenómeno de rotura (Mohr Coulomb) (Alejandro, 2016). Como resultado se obtienen superficies de falla circulares, planas o la combinación de ambas, provocando numerosas fallas, siendo las más comunes las rotacionales, traslacionales y por volteo (Instituto Nacional de Vías, 1998). La presencia de fallas provienen de una serie de movimientos complejos o la combinación de varios tipos que condicionan el análisis, control y estabilización del deslizamiento (Jiménez, 2006).

Considerando el criterio de Mohr Coulomb para la superficie de rotura que se encuentra definido por (Liu et al., 2020) :

$$\tau = c' + \sigma * \tan\phi \quad (1)$$

Donde, τ es el esfuerzo cortante en la superficie de falla, c' representa la cohesión efectiva, σ el valor del esfuerzo normal efectivo en la superficie de falla y ϕ corresponde al ángulo de fricción interna.

El continuo monitoreo de la zona de estudio, específicamente en el talud a analizar permitió que se identifique el tipo de falla y movimiento presentes en el, debido al patron actual se puede catalogar como una falla de deslizamiento traslacional como se evidencia en la figura 3.

Para la interpretación gráfica y análisis de la inestabilidad de taludes en la área de influencia, es necesario el uso de herramientas que permitan modelar una realidad paralela, facilitando la prueba de diversos escenarios que evidencien los posibles mecanismos de falla. Para realizar el modelado se requirió de un modelo de elevación digital del talud en la zona de estudio, a partir de imágenes satelitales de años átras y actuales se obtuvo mediante Google Earth y GlobalMapper.

Figura 3

Imagen falla talud en la zona de estudio



Nota. Superficie de falla traslacional. [Fotografía], por El autor, 2021.

El análisis de estabilidad del talud con los parámetros y características geomecánicas en esta investigación, exigen un gran número de iteraciones para obtener un factor de seguridad que cumpla con las solicitaciones, por tanto, se ha empleado softwares geotécnicos específicamente de Rocscience y Bentley, los cuales proporcionan herramientas necesarias para la modelación con y sin consideración sísmica en la zona de estudio (figura 4).

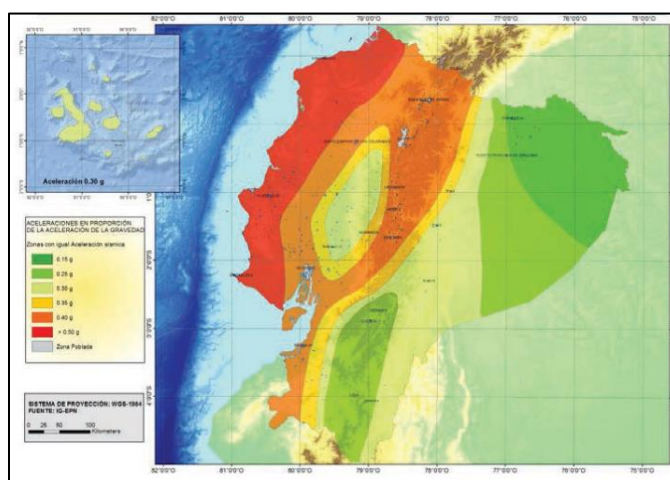
El cálculo de estabilidad del talud se ha realizado considerando lo siguiente:

- Definición de parámetros geomecánicos por cada estrato, como peso específico, ángulo de fricción y cohesión.

- Modelación del talud a partir de la geometría y estratigrafía.
- Aplicación de métodos de equilibrio límite según el criterio de Bishop Simplificado, Morgenstern-Price y Janbú.
- Aplicación de métodos probabilísticos, en donde se varía los valores de ángulo de fricción y cohesión según el criterio de Monte Carlo.
- Aplicación de medida de mitigación mediante geosintético.

Figura 4

Imagen Mapa zonas sísmicas en Ecuador



Nota. Adaptado de NEC - SE - DS (p.27), 2014.

1.3 Metodología

La metodología empleada en el presente trabajo permite analizar la probabilidad de falla del talud ubicado en la vía de integración barrial cerca de la intersección de la vía Loja-Malacatos. Este análisis parte de los parámetros geotécnicos del talud descritos anteriormente, generación del modelo geotécnico en donde se determina el factor de seguridad mediante equilibrio límite, luego realizar una comparación con el factor de seguridad mediante el análisis de Monte Carlo cuyos datos consideran la desviación estándar de los parámetros geomecánicos. Posterior, se plantea una medida de mitigación mediante el reforzamiento del talud con geosintético frente a la inestabilidad determinada.

1.3.1 Generación de Modelos Geotécnicos

Para generar los modelos en los softwares establecidos, se inicia con la subdivisión del talud en tres perfiles topográficos distribuidos al inicio (1), centro (2) y final (3). El análisis

de las condiciones y determinación de factor de seguridad se realizó inicialmente a través del uso de los softwares de Rocscience y Bentley a partir de las características geológicas y la ubicación del nivel freático en el caso del perfil central y final.

Tabla 2

Coordenadas de referencia de los perfiles del talud

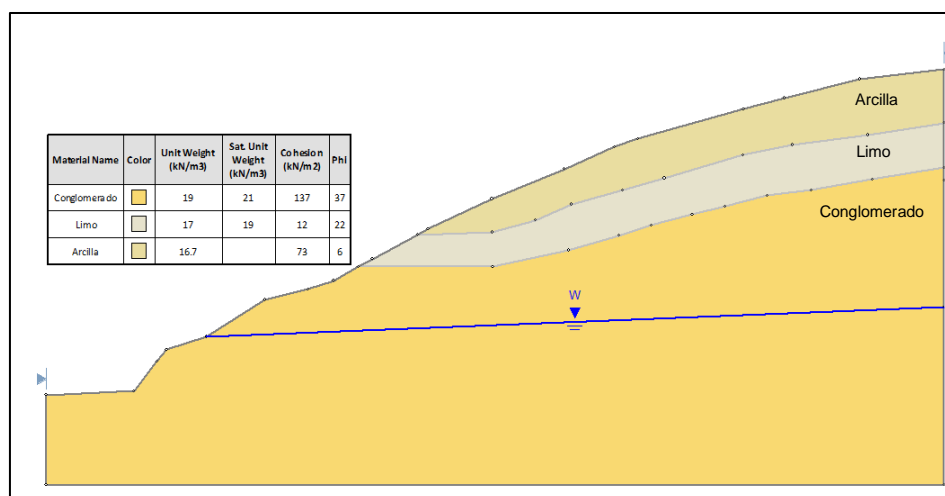
Perfiles	Coordenadas	
	X	Y
Inicio (Perfil 1)	699875	9552720
Centro (Perfil 2)	699868	9552758
Final (Perfil 3)	699863	9552781

Nota. En esta tabla se observan las coordenadas del pie de talud de cada perfil

Las coordenadas de los perfiles (tabla 2), permiten ubicar la zona de estudio en el modelo digital del terreno con ayuda del software Civil 3D. Como primera instancia se introdujo la geometría obtenida, en donde cada perfil se dividió en tres estratos visibles de conglomerado, limo y arcilla (figura 5), siguiendo una inclinación casi parapela al perfil del talud. Para cada suelo se colocaron las características geológicas indicadas en la tabla 1, y se consideró en el perfil 2 y 3 un nivel freático desde el eje de la vía a una altura de 10 m y 5 m respectivamente.

Figura 5

Imagen Geometría del perfil 2



Nota. Delimitación de estratos y asignación de características geomecánicas en software Rocscience.

1.3.2 Análisis determinístico de estabilidad de talud

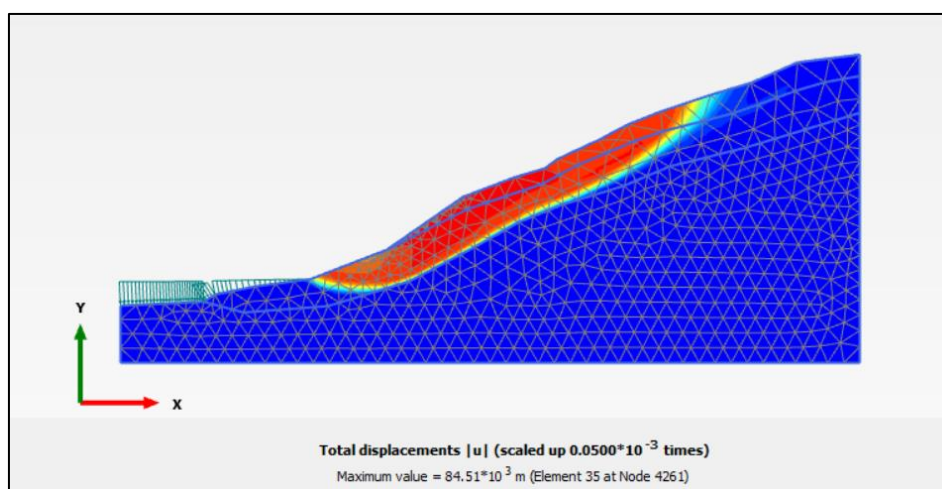
Los métodos determinísticos se caracterizan por emplear el criterio de equilibrio límite, este método se fundamenta en una reducción del factor de seguridad en un rango de potenciales superficies de falla, determinando así el factor de seguridad mínimo, conocido como la superficie de deslizamiento crítica (Fernández et al., 2018).

Los perfiles del talud en estudio se sometieron inicialmente al análisis de equilibrio límite para seguir un proceso de simulaciones que determinan el factor de seguridad mediante el método de Bishop Simplificado, Morgenstern–Price y Janbú.

El método de Bishop (1955) se fundamenta en el análisis de superficies de falla circulares, en donde se asume que las fuerzas entre dovelas se encuentran horizontales y satisface el equilibrio vertical y de momento (Orellana, 2017). Morgenstern – Price fue desarrollado en 1965, este método es aplicable a cualquier superficie, cuyo análisis asume una inclinación de fuerzas entre tajadas y satisface las condiciones de equilibrio en su totalidad (Reyes, 2019). Por último, el método de Janbú propuesto en 1968, se analiza en cualquier superficie, considerando las fuerzas horizontales entre tajadas, cumpliendo el equilibrio de fuerzas más no de momentos y los valores de FS son menores a los otros métodos (Orellana, 2017).

Figura 6

Imagen Superficie de falla del perfil 1



Nota. Desplazamiento total en la superficie de falla en software Bentley.

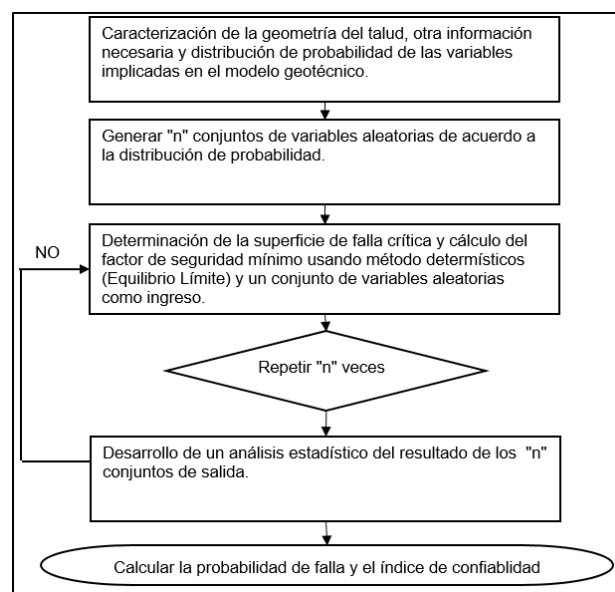
Una vez consideradas las características geomecánicas de los materiales, la geometría del talud y los métodos de equilibrio límite en el software de Bentley, se ha obtenido la superficie de falla que se puede observar en la figura 6.

1.3.3 Análisis probabilístico de estabilidad de talud

Al analizar la estabilidad de taludes surgen varias interrogantes tales como cambios en las propiedades geomecánicas de los materiales, como suelos residuales, tamaño de roca, meteorización química y desintegración física (Albarracín, 2020), por ende, la evaluación probabilística ofrece la ventaja de considerar de manera lógica la confiabilidad, facilitando el desarrollo de nuevas perspectivas (Fernández et al., 2018). El método de Monte Carlo desarrollado en 1949 por John Von Neumann y Stanislaw Ulam, es uno de los métodos para evaluar el problema de estabilidad al facilitar el análisis de confiabilidad utilizando superficies de deslizamiento (Jiang et al., 2015). Este método se sustenta en identificar un modelo determinista en el que se aplican múltiples variables de entrada con el fin de estimar un valor único (Sharma, 2015). El método de Monte Carlo sigue una serie de pasos establecidos para su análisis, estos se describen en la figura 7.

Figura 7

Imagen flujograma proceso de análisis método Monte Carlo



Nota. Adaptado de Efficient System Reliability Analysis of Slope Stability in Spatially Variable Soils Using Monet Carlo Simulation (p. 4),

por Jiang et al., 2015, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141 (2).

Al empezar el análisis mediante Monte Carlo, se deben repetir los pasos 1 y 2 tantas veces se requiera, con la finalidad de determinar una adecuada distribución de FS y probabilidad de falla, para obtener el número de ensayos requeridos se emplea la ecuación 2 (Sharma, 2015):

$$N = \left(\frac{d^2}{4(1-e)^2} \right)^m \quad (2)$$

Donde, N es el número de ensayos de Monte Carlo, d corresponde a la desviación estándar que se encuentra delimitada con las características geomecánicas específicamente un ángulo de fricción mínimo y máximo, como una cohesión mínima y máxima, e se refiere al nivel de confianza deseado y m es el número de variables a analizar.

La variabilidad de las propiedades geomecánicas influyen directamente en el análisis propuesto por Monte Carlo y es necesario complementar mediante un índice de confiabilidad. El índice de confiabilidad describe la seguridad del talud, afectado por parámetros geomecánicos inciertos del análisis probabilístico, en base al número de desviación estándar y el factor de seguridad (Alejandro, 2016). Se calcula a partir de la ecuación 3 (Reale et al., 2015):

$$\beta = \frac{(E(FS) - 1)}{\sigma(FS)} \quad (3)$$

Donde, β corresponde al índice de confiabilidad, $E(FS)$ es el promedio de los factores de seguridad o el factor de seguridad crítico establecido con los métodos determinísticos, y $\sigma(FS)$ representa la desviación estándar de factores de seguridad.

Capítulo dos

Análisis de Resultados

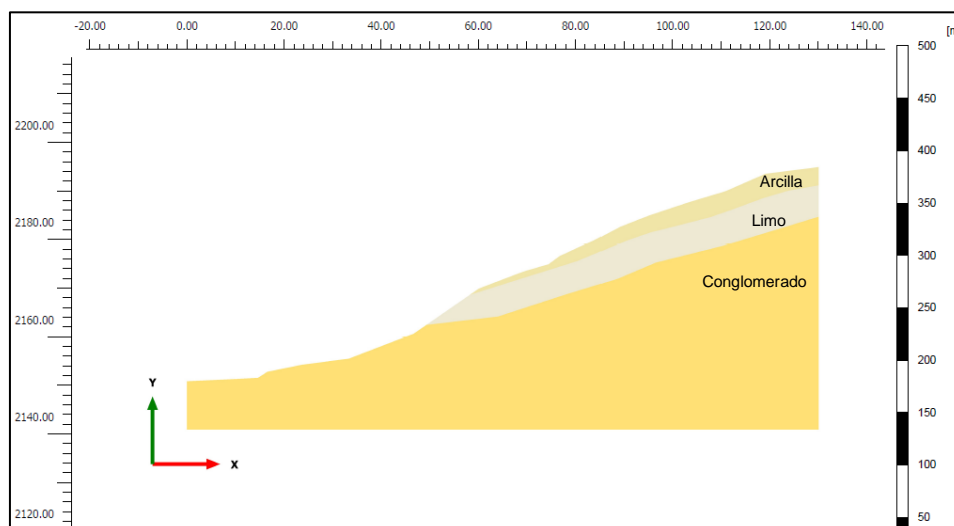
Los parámetros geomecánicos resumidos en la tabla 1 han sido evaluados en tres etapas específicas de las cuales: la primera comprende el análisis determinístico, en el cual se obtiene los factores de seguridad para los distintos perfiles considerados en la zona de estudio; la segunda etapa corresponde al análisis probabilístico aplicando el método de Monte Carlo, para determinar el índice de confiabilidad y probabilidad de falla del talud y la tercera etapa incluye la evaluación y propuesta de una medida de mitigación para el reforzamiento frente a la inestabilidad del talud.

2.1 Análisis de estabilidad en condiciones actuales

Con base en las características geomecánicas y configuración geométrica del área de estudio se generaron los modelos numéricos de los perfiles del talud (figura 8, 9 y 10) propuestos en la metodología de este estudio. Para analizar la estabilidad del talud, se sometió los perfiles a un análisis iterativo, lo que permite determinar los distintos factores de seguridad.

Figura 8

Imagen perfil 1



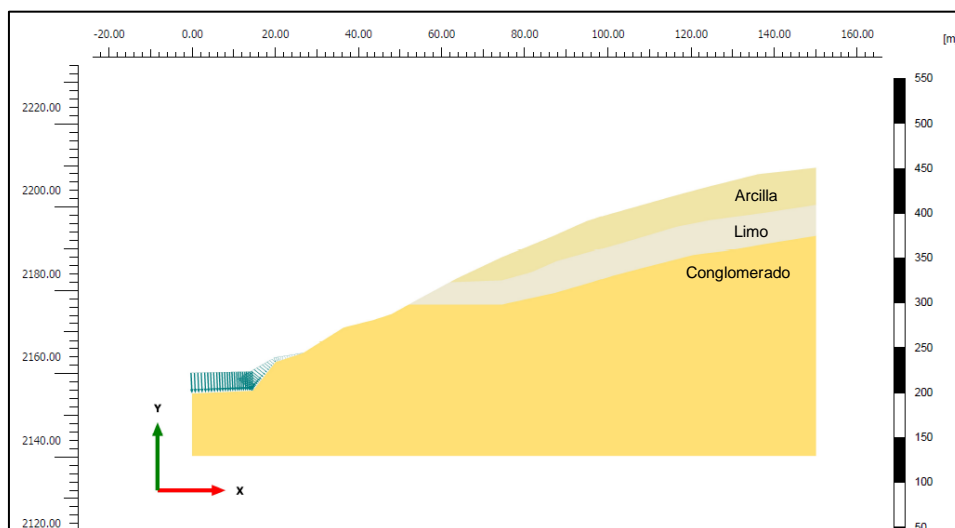
Nota. Modelación en software geotécnico especializado Bentley.

El factor de seguridad representa el margen de confianza que dispone el diseño realizado (Jiménez, 2006). En Ecuador el factor de seguridad se encuentra establecido bajo

las solicitaciones de la normativa ecuatoriana, cuyos valores mínimos corresponden a 1.5 en diseño y 1.3 en construcción (NEC, 2014). Los valores establecidos en la normativa ecuatoriana se utilizan para realizar una comparación entre los FS y determinar el perfil crítico en la zona de estudio.

Figura 9

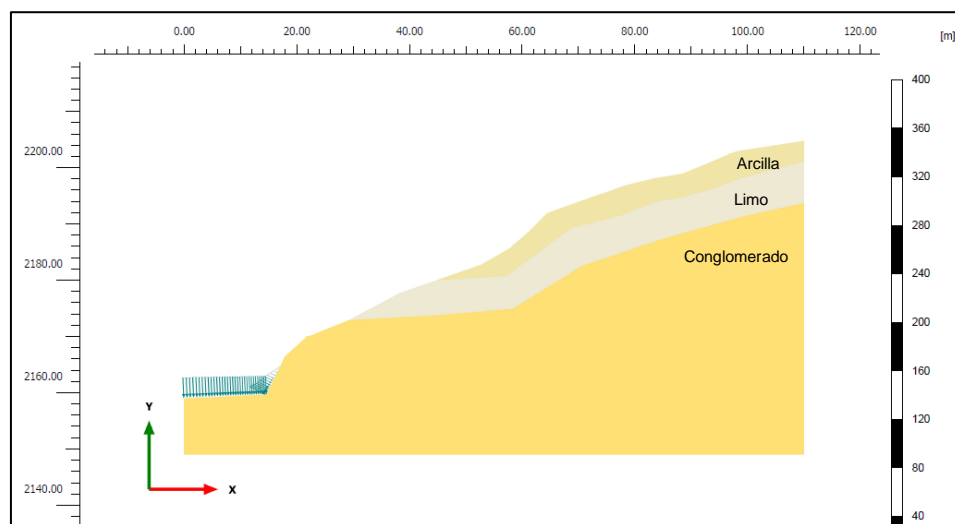
Imagen perfil 2



Nota. Modelación en software geotécnico especializado Bentley.

Figura 10

Imagen perfil 3



Nota. Modelación en software geotécnico especializado Bentley.

2.1.1 Métodos determinísticos: equilibrio límite

Para el análisis determinístico se consideraron dos escenarios distintos. El primer escenario muestra los modelos numéricos mediante software de Rocscience y Bentley basados en el criterio de falla de Morh Coulomb sin carga sísmica (tabla 3 y 4), mientras que el segundo escenario evalúa el comportamiento empleando la misma metodología con la presencia de carga sísmica (tabla 5 y 6), con base en la ubicación del área de estudio correspondiente a la ciudad de Loja (zona 2) se consideró una aceleración sísmica de 0.2 g en carga horizontal y 0.13 en vertical, valor propuesto por la normativa ecuatoriana (NEC, 2014). Para los fines pertinentes se obtienen los siguientes valores de FS.

Tabla 3

Factores de seguridad: métodos determinísticos

Perfiles	Factor de Seguridad			
	Bishop Simplificado	Morgenstern – Price	Janbú Simplificado	Métodos Numéricos
Inicio (Perfil 1)	1.478	1.468	1.465	1.36
Centro (Perfil 2)	1.652	1.650	1.628	1.53
Final (Perfil 3)	1.371	1.385	1.349	1.26

Nota. En esta tabla se presentan los FS obtenidos en los softwares de Rocscience sin carga sísmica.

Tabla 4

Factor de seguridad: métodos determinísticos

Perfiles	Factor de Seguridad
	Métodos Numéricos
Inicio (Perfil 1)	1.444
Centro (Perfil 2)	1.636
Final (Perfil 3)	1.382

Nota. En esta tabla se presentan los FS obtenidos en el software de Bentley sin carga sísmica.

Los valores de FS obtenidos (tabla 3 y 4) para cada perfil representan la condición del talud, siendo los perfiles 1 y 3 los más vulnerables a presentar superficies críticas de rotura y

falla, debido a que los valores de FS se encuentran inferiores y cercanos a los mínimos establecidos en la normativa ecuatoriana. La media estadística de factor de seguridad obtenida en este escenario es de 1.337.

Tabla 5

Factores de seguridad: métodos determinísticos con sismo

Perfiles	Factor de Seguridad			
	Bishop Simplificado	Morgenstern - Price	Janbú Simplificado	Métodos Numéricos
Inicio (Perfil 1)	0.953	0.938	0.935	0.82
Centro (Perfil 2)	1.041	1.034	1.016	0.91
Final (Perfil 3)	0.928	0.927	0.912	0.79

Nota. En esta tabla se presentan los FS obtenidos en los softwares de Rocscience.

Tabla 6

Factores de seguridad: métodos determinísticos con sismo

Perfiles	Factor de Seguridad
	Métodos Numéricos
Inicio (Perfil 1)	0.898
Centro (Perfil 2)	1.011
Final (Perfil 3)	0.886

Nota. En esta tabla se presentan los FS obtenidos en el software de Bentley.

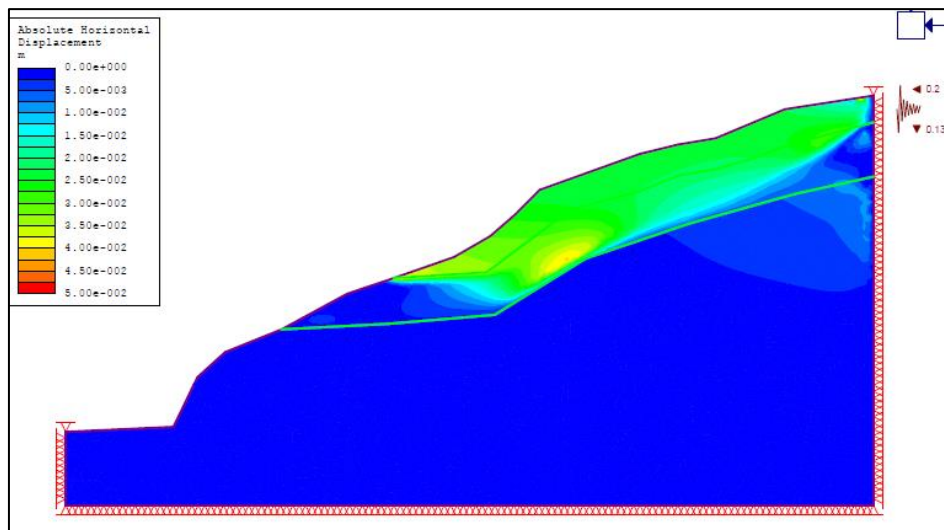
Al estimar una carga sísmica en cada perfil, se puede observar que los valores calculados de FS disminuyen drásticamente, dando como resultado valores inferiores a 1 en los perfiles 1 y 3 siendo estos analizados en los softwares de Rocscience. Para este escenario la media estadística de factor de seguridad es de 0.865. Los softwares empleados también grafican la masa de la superficie de deslizamiento generada en cada perfil, a partir de los parámetros de resistencia al corte de los suelos que conforman la estratigrafía del talud, la superficie generada indica tentativamente el volumen de masa a deslizarse (figura 11).

2.1.2 Perfil crítico

Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento en cada perfil, observando un comportamiento similar entre el perfil 1 y 3, considerando el perfil 3 como el más crítico debido a que los valores de FS para este son los más desfavorables. En el caso del perfil 2 los valores de FS se mantiene mayores, lo que representa que las fuerzas resistentes son mayores a las fuerzas actuantes o desestabilizantes teniendo así un aumento en el factor de seguridad.

Figura 11

Imagen superficie de falla del perfil 3



Nota. Desplazamiento total generado con el software Rocscience, considerando carga sísmica.

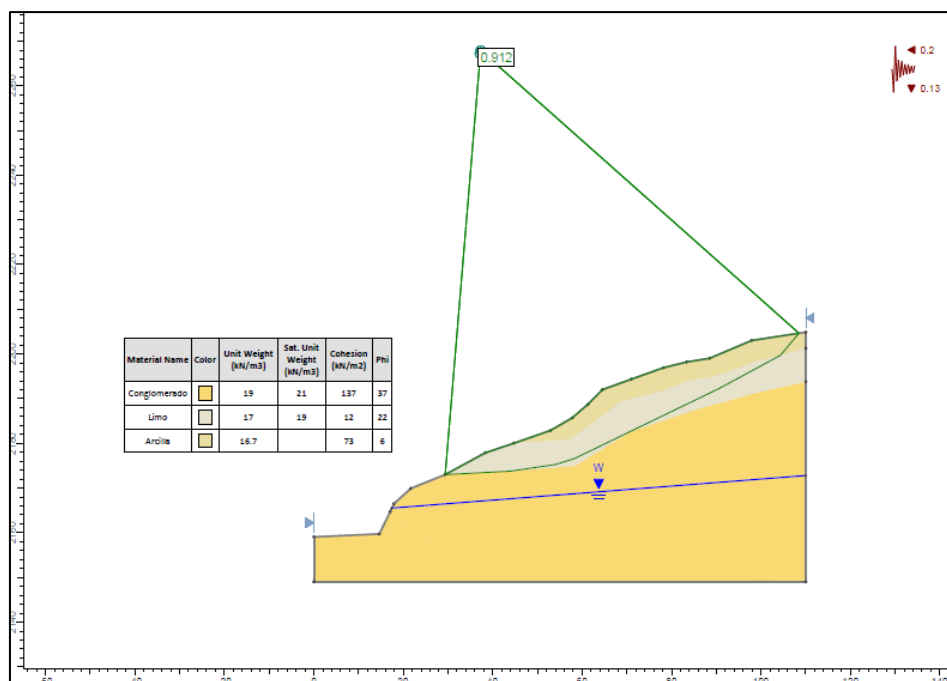
Después de comparar los escenarios, el perfil 3 al presentar los valores de FS más desfavorables, representa un mayor riesgo de inestabilidad, esto se puede evidenciar en la superficie de falla generada en el software geotécnico de Rocscience (figura 12) donde los estratos principalmente comprometidos corresponden al limo y arcilla. Debido a las condiciones actuales del talud y las afecciones producidas por la lluvia como resultado han dado la propagación de escombros en la zona de estudio se escoge este perfil para realizar el análisis probabilístico sometido a equilibrio límite con la finalidad de establecer la correcta medida de mitigación con el uso de geosintético.

2.2 Análisis de estabilidad según Monte Carlo

Tal como ya se expuso en metodología, para el análisis probabilístico de estabilidad según Monte Carlo, se consideraron como variables los parámetros geomecánicos de cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ). Para cada simulación se establece un incremento o disminución de estas variables en rangos establecidos según las características geomecánicas de cada estrato, en donde la base del desarrollo es el modelo determinista generado anteriormente.

Figura 12

Imagen superficie de falla del perfil 3: método de Janbú



Nota. Círculo de falla generado con el software Rocscience, considerando el escenario más crítico con carga sísmica.

El análisis de estabilidad se realiza a partir del menor factor de seguridad obtenido en el análisis determinista, el cual corresponde al método de Janbú. El desarrollo de este análisis inicia en la determinación del rango de los parámetros geomecánicos de cada estrato, esto en función a valores obtenidos que se reflejan en la tabla 7 con la finalidad de obtener los valores aleatorios.

Tabla 7*Valores típicos de cohesión y ángulo de fricción*

Suelos	Parámetros Geomecánicos		Referencias
	Cohesión (c) kN/m ²	Ángulo de fricción (ϕ)	Adaptado de
Conglomerado	98-196	15-25 °	(K. Sánchez, 2021)
Limo	4-12	22-32 °	(Braja Das, 2012)
Arcilla	20-80	0-35 °	(Hidalgo Montoya & Pacheco de Assis, 2011) y (Braja Das, 2012)

Nota. En esta tabla se presentan los rangos de cohesión y ángulo de fricción para los distintos suelos presentes en el talud.

2.2.1 Generación de valores aleatorios

Para la modelación mediante análisis probabilístico se consideran dos escenarios, el primero es el cálculo del factor de seguridad sin carga sísmica y el segundo corresponde al mismo cálculo con presencia de carga sísmica. Para generar estos modelos se realizaron 10 combinaciones posibles entre los valores aleatorios para cohesión y ángulo de fricción utilizando distribución normal según lo recomienda el U.S Army corps of Engineers (Sánchez, 2021). Al considerar una distribución normal, se obtiene una agrupación adecuada debido a que se emplea la desviación estándar, permitiendo conocer la dispersión de los datos analizados, para así establecer un nivel de confianza. Los valores de desviación estándar para cada estrato se presentan en la tabla 8 y los valores aleatorios obtenidos se muestran en la tabla 9 para los escenarios 1 y 2.

Tabla 8*Valores de desviación estándar para los suelos presentes*

Suelos	Desviación Estándar	
	Cohesión (c)	Ángulo de fricción (ϕ)
Conglomerado	26.501	2.667
Limo	1.988	2.348
Arcilla	20.028	11.068

Nota. En esta tabla se presentan los valores de la desviación estándar de los rangos establecidos de cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 9

Combinaciones posibles de valores aleatorios para cohesión y ángulos de fricción perfil 3.

Suelos	Parámetros Geomécánicos					
	Conglomerado		Limo		Arcilla	
	Cohesión (c) kN/m ²	Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (c) kN/m ²	Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (c) kN/m ²	Ángulo de fricción (ϕ)
1	102	16	4	24	27	4
2	115	17	5	22	32	7
3	124	18	12	25	48	12
4	133	20	9	28	50	19
5	159	21	10	32	67	23
6	180	23	4	23	72	7
7	148	21	7	27	40	3
8	163	22	11	32	75	10
9	170	19	8	28	54	9
10	192	20	6	22	67	23

Nota. En esta tabla se presentan los valores empleados en el análisis

probabilístico según el método de Monte Carlo.

Para las 10 combinaciones presentadas, se generan modelos con ayuda del software geotécnico de Rocscience aplicando el análisis probabilístico, del cual se obtienen los valores de factor de seguridad que se presentan en la tabla 10 considerando ambos escenarios propuestos.

Tabla 10

Factores de seguridad: método de Monte Carlo.

Combinación	Factor Seguridad	
	Sin carga sísmica	Con carga sísmica
1	1.122	0.761
2	1.084	0.729
3	1.411	0.987
4	1.497	1.001
5	1.769	1.181
6	1.230	0.825
7	1.378	0.933
8	1.823	1.220
9	1.493	1.002
10	1.287	0.850

Nota. En esta tabla se presentan los valores de FS del perfil 3

obtenidos en el software Rocscience.

Para terminar el análisis probabilístico se escoge un escenario de los obtenidos aleatoriamente, la combinación seleccionada es la número 10 (tabla11), ya que los factores y parametros se acercan más a las condiciones naturales del suelo.

Tabla 11

Resumen valores combinación 10 para factor de seguridad

Suelos	Parámetros Geomecánicos		Factor de Seguridad	
	Cohesión (c)	Ángulo de fricción (ϕ)	Sin carga sísmica	Con carga sísmica
Conglomerado	192	20		
Limo	6	22	1.287	0.850
Arcilla	67	23		

Nota. En esta tabla se presentan los datos base de la combinación seleccionada para medida de mitigación.

2.3 Medidas de mitigación

Cuando un talud ha sufrido deformaciones debido a varios factores externos o internos, es necesario adoptar medidas de mitigación para elevar el FS. Estas medidas varían según las condiciones y características de la obra y del suelo, se consideran medidas óptimas aquellas que consiguen la estabilidad del talud tanto a corto como largo plazo y favorecen la economía del mismo.

Para los problemas existentes en la vía de integración barrial, específicamente en la zona de estudio se requiere una medida de mitigación que permita la estabilización del talud, según el perfil más crítico. Dentro de las medidas de mitigación se encuentran varias metodologías, entre ellas están las obras de contención y el reforzamiento mediante el uso de geosintéticos. Frente a estas condiciones para el talud en análisis se profundiza el empleo de geosintéticos con ayuda del análisis probabilístico en el escenario 10.

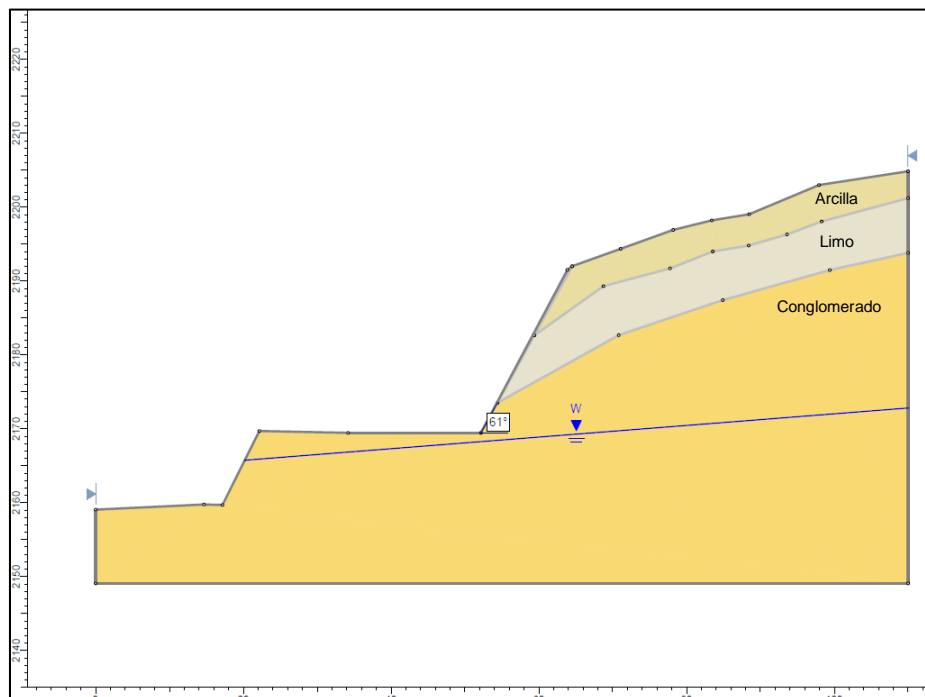
Los geosintéticos conforman una medida de mitigación económica y viable, al estar constituidos por materiales plásticos y textiles que brindan flexibilidad y la capacidad de disminuir las deformaciones provocadas (Jiménez, 2006). Por su versatilidad, rigidez uniaxial o biaxial, facilidad de construcción y soporte de grandes cargas a corto y largo plazo y su

capacidad de aumentar significativamente la resistencia al cortante de suelos, se selecciona las geomallas para el análisis de estabilidad.

Para empezar a remediar el talud, se consideró la zona en la que se produce la superficie de falla. Esta zona contiene un estrato limoso y arcilloso, por ende al inicio de esta zona se realizará un corte con altura de 22.5 m en donde se emplazara material de relleno compactado intercalado con geomalla. En taludes reforzados con geosintéticos se recomienda que la inclinación de la fachada sea menor a 70° (Suárez, 2009), en este caso se utilizó una inclinación de 61° .

Figura 13

Imagen nueva geometría para el perfil 3



Nota. Corte para reforzamiento con material de relleno en el software Rocscience, considerando inclinación recomendada.

Al considerar las propiedades de los suelos de la tabla 11 y la nueva geometría del talud se genera el modelo digital en el software de Rocscience (figura 13). Para evitar un incremento en la presión de poros y así reducir la resistencia cortante del suelo el material de relleno corresponde a material granular típico cuyos parámetros geomecánicos se presentan

en la tabla 12. Es importante considerar que el talud reforzado mecánicamente cuente con todas las medidas complementarias de modo que se asegure la vida útil del mismo.

Tabla 12

Valores típicos para material de relleno granular

Suelo	Parámetros Geomecánicos		
	Peso específico (γ) (kN/m ³)	Cohesión (c) (kN/m ²)	Ángulo de fricción (ϕ)
Material granular	17 - 21	0	36-41

Nota. En esta tabla se presentan los rangos establecidos para el material de reforzamiento. Adaptado de Braja Das, 2012.

2.3.1 Análisis de estabilidad con geosintéticos

Para el análisis de estabilidad se consideran dos tipos de geomallas tipo FORTGRID UX uniaxiales elaboradas de Poliester de Alta Tenacidad (PET), con distintas resistencias que el fabricante establece en las especificaciones. La geomalla deberá contar con un espaciamiento adecuado el cuál depende de las resistencias dadas por el fabricante, la presión lateral ejercida y el factor de seguridad establecido por la normativa ecuatoriana de 1.3 a 1.5. En la tabla 13 se presentan los valores necesarios para el diseño con geosintético.

Tabla 13

Especificaciones Geomalla FORTGRID UX

Especificaciones Técnicas	Norma de ensayo	Geomalla	
		UX 75	UX 100
Resistencia última a la tensión (MD) (kN/m)	ASTM D 6637	80.0	115.0
Resistencia última a la tensión (TD) (kN/m)	ASTM D 6637	25.0	25.0
Tamaño abertura (MD) (mm)	-	31	30
Tamaño abertura (TD) (mm)	-	27	21
Espaciamiento Vertical (Sv)	-	0.3	0.3

Nota. En esta tabla se presenta un resumen de las especificaciones de la geomalla seleccionada. Adaptado de GEOMATRIX, 2021.

2.4 Análisis de Resultados

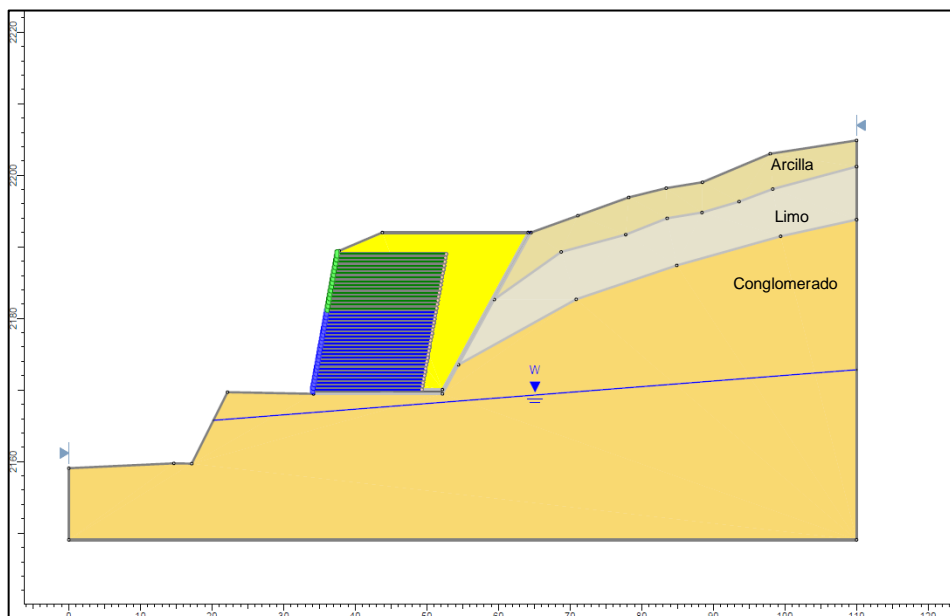
Los métodos probabilísticos actualmente son convenientes en relación con los métodos determinísticos cuando se trata de suelos en los que se desconoce la confiabilidad

de los parámetros geomecánicos y permiten evaluar el riesgo de deslizamiento mediante una infinidad de escenarios potenciales para el factor de seguridad (Dyson & Tolooiyan, 2020). En el análisis probabilístico del talud se consideró una variabilidad en los parámetros geomecánicos mediante desviación estándar y se evaluó la estabilidad del mismo en las nuevas condiciones dando como resultado factores de seguridad por debajo de lo establecido en la normativa ecuatoriana de construcción y una probabilidad de falla del 96.4% obtenida en el software de Rocscience, que representa un problema de inestabilidad.

Debido a esta situación, el perfil 3 fue sometido a una medida de mitigación la cual consiste en el reforzamiento del talud mediante el uso de geosintéticos (geomallas) (figura 14), se obtiene que al emplear la geomalla UX 100 el factor de seguridad es mayor y la probabilidad de falla disminuye considerablemente en comparación con la geomalla UX 75. Los valores obtenidos son aceptables con los recomendados por la NEC, 2014.

Figura 14

Imagen medida de mitigación para perfil 3



Nota. Reforzamiento de talud con geosintético en el software Rocscience considerando parámetros geomecánicos de la tabla 11.

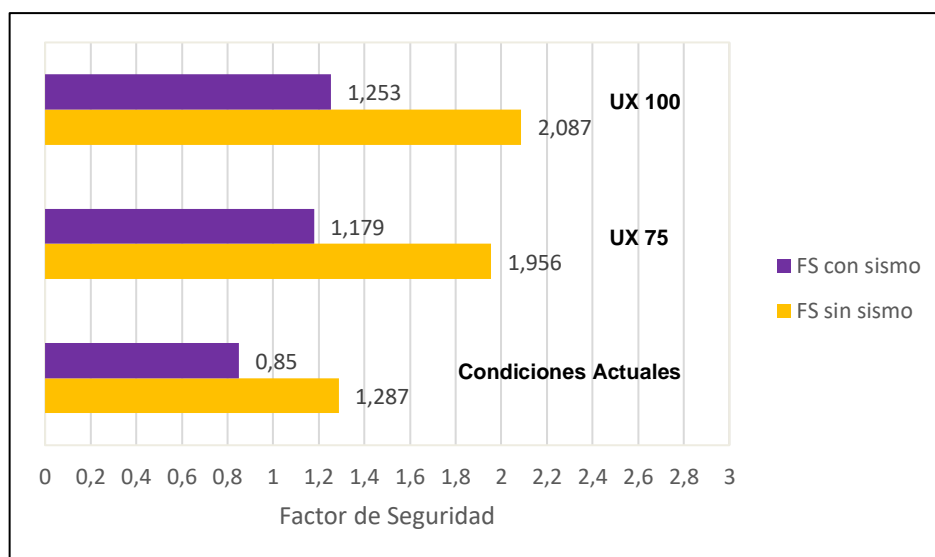
2.4.1 Factor de Seguridad

Al analizar el comportamiento del talud reforzado con geomallas, se presentan tres escenarios posibles, el primero es la combinación de la geomalla UX 75 y UX 100, el segundo

escenario emplea la geomalla UX 75, y el tercer escenario la geomalla UX 100. Los factores de seguridad fueron obtenidos con el software de Rocscience aplicando los métodos determinísticos, en donde se observa que los valores de FS más altos corresponden al escenario tres al usar geomalla UX 100, los valores al utilizar geomalla UX 75 son muy similares, sin embargo, para el primer escenario que corresponde a la combinación de ambas geomallas son idénticos al escenario tres. En la figura 15 se presenta el análisis comparativo en diferentes condiciones.

Figura 15

Imagen variación de FS en condiciones actuales y con medida de mitigación.



Nota. Comparativa entre FS obtenidos con el método de Janbú aplicando la medida de mitigación al talud.

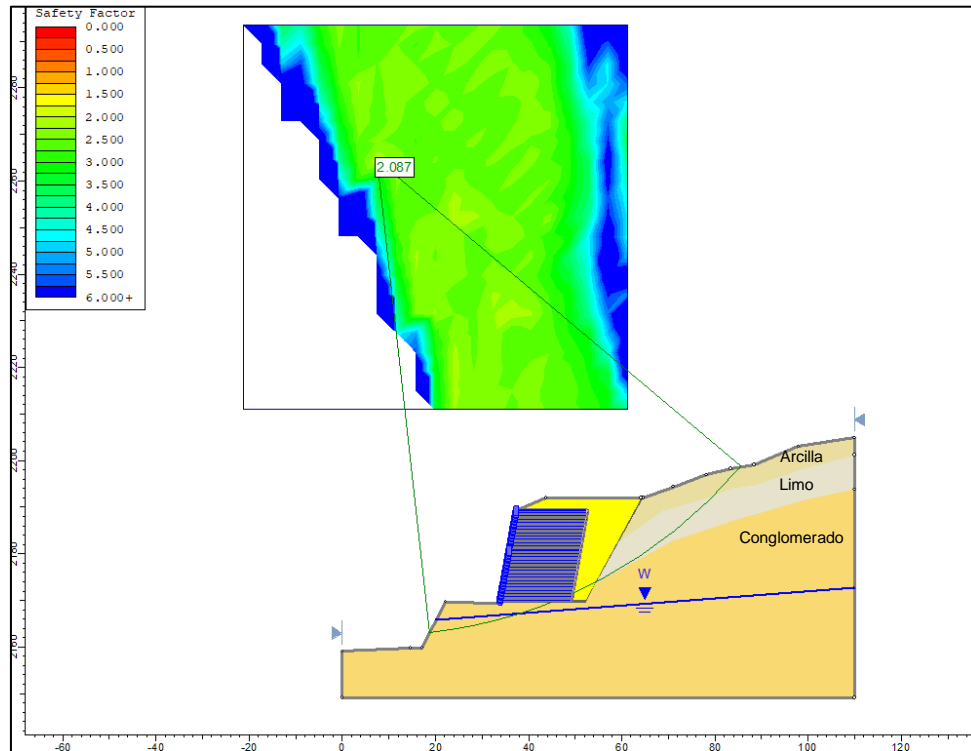
Considerar una medida de mitigación como el reforzamiento de talud con geosintético ha permitido que el factor de seguridad aumente, logrando traspasar los valores mínimos establecidos. En el análisis se buscó que el factor de seguridad pase de 1 y 1.3 considerando carga sísmica y sin su consideración, en todos los escenarios propuestos la medida de mitigación satisface los requerimientos de diseño permitiendo estabilizar el talud.

El factor de seguridad al incrementar su valor, conlleva a una disminución en la superficie de falla evitando los posibles deslizamientos, la nueva superficie de deslizamiento se analizó igualmente para un escenario sin y con carga sísmica (figura 16 y 17). Estas

superficies se evidencian en los resultados dados por el software de Rocscience donde los suelos aún inestables corresponden al limo y arcilla.

Figura 16

Imagen círculo de falla perfil 3 con medida de mitigación



Nota. Reforzamiento de talud con geosintético sin carga sísmica en el software Rocscience .

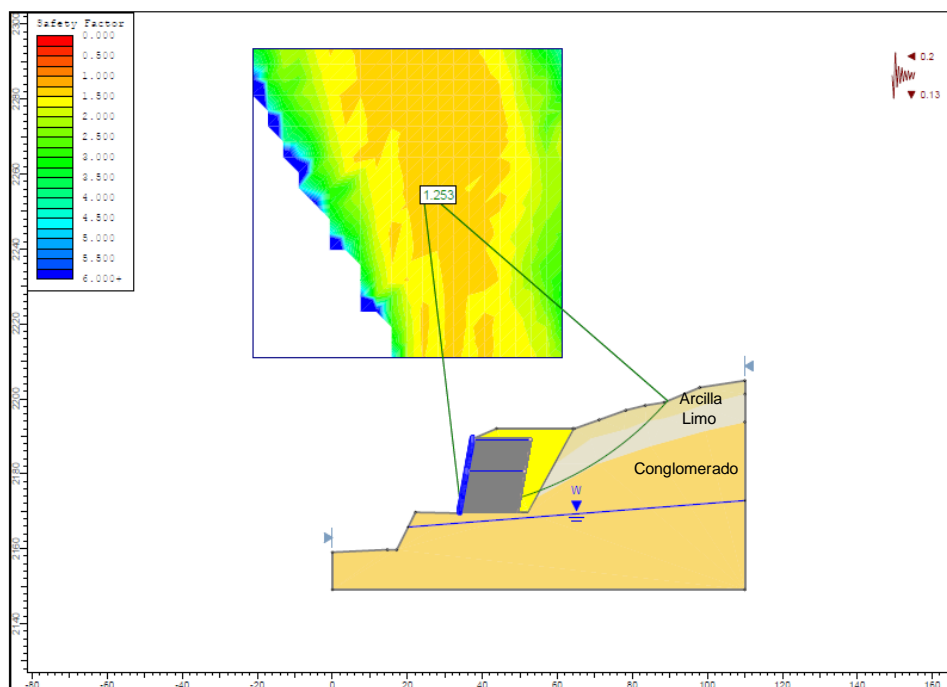
Los geosintéticos como medida de mitigación satisfacen los requerimientos de estabilidad, al ser una medida viable, económica y de fácil construcción permite brindar a las comunidades mejores espacios en los que desarrollen sus actividades con normalidad.

2.4.2 Índice de confiabilidad y probabilidad de falla

Dentro del análisis probabilístico, el índice de confiabilidad y probabilidad de falla son criterios relevantes al momento de analizar la estabilidad, según lo establecido un talud con un índice de confiabilidad mayor a 1 es estable (Albarracín, 2020). Al evaluar las condiciones actuales del talud se evidencia que el talud es inestable, mientras que al aplicar las medidas de mitigación se puede evidenciar un cambio en el estado del mismo elevando el índice de confiabilidad y disminuyendo la probabilidad de falla.

Figura 17

Imagen círculo de falla perfil 3 con sismo y medida de mitigación



Nota. Reforzamiento de talud con geosintético en el software Rocscience .

La opción más óptima de geosintético es la geomalla UX 100, debido a que cumple con los requerimientos técnicos tanto de factor de seguridad como índice de confiabilidad y es económicamente accesible. Los valores obtenidos para el análisis probabilístico se resumen en la tabla 14.

Tabla 14

Resultados análisis probabilístico

Condición Talud	Factor de Seguridad		Índice de Confiabilidad		Desviación Estándar
	Mín	Máx	Sin Sismo	Con Sismo	
Condiciones actuales	0.850	1.287	0.66	0.38	0.303
Geomalla UX 75	1.179	1.956	2.40	0.45	0.397
Geomalla UX 100	1.253	2.087	6.07	1.42	0.179

Nota. En esta tabla se presenta un resumen de los resultados obtenidos para el talud analizado con métodos probabilísticos frente a equilibrio límite utilizando geosintéticos.

Conclusiones

Los métodos empleados para el análisis de estabilidad de taludes se fundamentan en planteamientos físico-matemáticos, en donde las fuerzas actuantes o desestabilizadoras y las resistentes o estabilizadoras influyen en el talud y definen su comportamiento. En la etapa de recopilación de información geotécnica, se reconoce que los tipos de suelos que conforman el talud son principalmente de la formación Quillollaco, en donde destacan estratos visualmente diferenciados de arcillas de mediana a baja plasticidad, limos y conglomerados pobres.

Con base en los estudios geológicos y geotécnicos obtenidos de la literatura, se determinaron para cada estrato que conforman el talud los parámetros geomecánicos como los son el peso específico (γ), ángulo de fricción interna (ϕ) y cohesión (c) sobre los cuales se realizó la modelación del talud en los softwares geotécnicos especializados.

El factor de seguridad y la superficie crítica para el análisis determinístico se determinó con base en la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC, 2014) considerando los valores 1.3 sin sismo y de 1 con sismo, generando dos escenarios empleando los criterios de Bishop simplificado, Morgenster – Price y Janbú.

El método de Janbú da como resultado los factores de seguridad más críticos. En condiciones actuales el talud presenta factores de seguridad de 1.349 y 0.912 para los escenarios 1 y 2 respectivamente lo que representa inestabilidad del talud sometido a equilibrio límite.

En el análisis probabilístico de estabilidad del talud se aplica la variabilidad de los datos (cohesión y ángulo de fricción), al generar aleatoriamente 10 combinaciones posibles entre los parámetros establecidos para ambos escenarios, se obtiene para cada combinación un valor de factor de seguridad mediante el software de Rocscience considerando una distribución normal. Los factores de seguridad resultantes del análisis probabilístico contienen una información más completa y realista al considerar varias superficies de falla, además este análisis permite complementar la información a través del índice de confiabilidad y la probabilidad de falla.

Alterar los parámetros geomecánicos de los estratos del talud genera una infinidad de factores de seguridad aumentando o disminuyendo la probabilidad de deslizamientos. Mientras mayores sean los valores del ángulo de fricción y de la cohesión o las condiciones del suelo sean mejores, el factor de seguridad será mayor.

Como medida de mitigación a la inestabilidad de taludes se planteo el reforzamiento mecánico del talud con geosintético. El talud reforzado mecánicamente considera una altura de 22.55 metros, un ancho de 18 metros y un espaciamiento vertical de 0.3 metros entre geomallas.

Para el análisis de geosintéticos, se uso geomallas UX 75 y UX 100 por sus ventajas en el reforzamiento de taludes. El índice de confiabilidad al usar geomallas aumenta significativamente, teniendo así valores de 2.40 y 0.45 en los escenarios 1 y 2 para una geomalla tipo UX 75; mientras que para una geomalla UX 100 se obtuvo valores de 6.07 y 1.42 en los escenarios 1 y 2. Al realizar una comparación con el valor recomendado de 1, la geomalla UX 75 no cumple en su totalidad ya que al someterse al escenario 2 el índice de confiabilidad es menor a 1, por lo que desde este punto de vista no es una opción viable.

Considerando los factores de seguridad de la combinación 10 obtenidos en el análisis probabilístico sometido a equilibrio límite y según el criterio de la NEC, 2014, el uso de geomallas UX 75 y UX 100 cumplen como medida de mitigación a la inestabilidad del talud. Para el talud reforzado con geomalla UX 75 posee factores de seguridad de 1.956 y 1.179 para los escenarios 1 y 2, mientras que para la geomalla UX 100 son de 2.087 y 1.253 respectivamente.

Si bien la geomalla UX 75 cumple con los factores de seguridad recomendados, su índice de confiabilidad en el escenario 2 no cumple, por tanto el refuerzo mecánico del talud con geomalla UX 100 se considera como la opción de medida de mitigación cumpliendo los factores de seguridad e índice de confiabilidad requeridos para el estudio.

Recomendaciones

Este trabajo de investigación se fundamentó especialmente en estudios geotécnicos existentes de la zona de estudio, por tanto se recomienda que para futuros trabajos se realicen los debidos ensayos y estudios geotécnicos y geológicos, además de un monitoreo continuo que en conjunto permitan determinar los parámetros geomecánicos de los suelos presentes en la zona de estudio con la finalidad de que estos tengan una confiabilidad mayor y así los análisis de estabilidad de taludes sean más precisos en relación a los factores de seguridad.

El uso de softwares especializados permiten realizar una modelación correcta que facilita la obtención de los valores de FS, así como distintos escenarios para la superficie de falla aplicando distintas metodologías. Los softwares de Rocscience permiten analizar mediante métodos determinísticos y probabilísticos basados en equilibrio límite y empleando métodos numéricos. Mientras que el software de Bentley analiza considerando la metodología de elementos finitos. Ambos softwares presentan resultados confiables y eficientes.

En el presente trabajo se realizó el análisis probabilístico considerando como variables de entrada los parámetros de cohesión y el ángulo de fricción y se empleo el criterio de falla de Mohr Coulomb, para investigaciones posteriores se recomienda adicionar una variable más como el peso específico del suelo para obtener valores más precisos y una confiabilidad mayor en escenarios distintos.

Al emplear una medida de mitigación es necesario que esta se encuentre con todas las obras complementarias que requiere, implementar obras de drenaje con la finalidad de evitar que el agua sature las obras de contención y estas colapsen. Así mismo al emplear geosintéticos si bien el escogido es una geomalla UX, existen otros tipos y fabricantes que se encuentran en el mercado con productos similares los cuales pueden ser empleados en estudios para comparar los resultados tanto en eficiencia como económicamente.

Referencias

- Acosta, M. (2014). *Estudio Paso Lateral*.
- Albarracín, F. (2020). *Análisis de estabilidad de un talud reforzado con geosintéticos mediante métodos probabilísticos y equilibrio límite. Caso de estudio: talud del coliseo multiusos del GAD de Sinincay* [Tesis de Maestría, Universidad Técnica Particular de Loja].
- Alejandro, V. (2016). *Estudio de la estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto considerando el análisis de la confiabilidad* [Tesis de Titulación, Universidad Técnica Particular de Loja].
- Braja Das, M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.
- Cueva, M. (2017). *Análisis de construcción de la vía de integración barrial de la ciudad de Loja* [Tesis de Maestría, Universidad Técnica Particular de Loja].
- Diario La Hora. (2020). MTOP se compromete a mejorar el Paso Lateral de Loja este año. *La Hora*. <https://bit.ly/3roffXF>
- Dyson, A. P., & Tolooiyan, A. (2020). Comparative Approaches to Probabilistic Finite Element Methods for Slope Stability Analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 100. <https://bit.ly/3AVulqD>
- Fernández, W., Villalobos, S., & King, R. (2018). Probabilistic analysis of slope stability in completely decomposed granite residual soils. *Ingenieria de Construccion*, 33(1), 5–14. <https://bit.ly/3Gt5VWp>
- GEOMATRIX. (2021). *Ficha Técnica FORTGRID*. <https://bit.ly/3IYUgk1>
- Hidalgo Montoya, C. A., & Pacheco de Assis, A. (2011). Herramientas Para Análisis por Confiabilidad en Geotécnica: La Teoría. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 69–78. <https://bit.ly/3ghCz2L>
- Instituto Nacional de Vías. (1998). *Manual Estabilidad de Taludes*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Jiang, S.-H., Li, D.-Q., Cao, Z.-J., Zhou, C.-B., & Phoon, K.-K. (2015). Efficient System Reliability Analysis of Slope Stability in Spatially Variable Soils Using Monte Carlo Simulation. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(2).

<https://bit.ly/3uIYYnH>

- Jiménez Jiménez, B. C. (2015). *Susceptibilidad a deslizamientos en la vía de Integración Barrial desde el KM 5+400 m hasta el KM 6+300 m en el sector Occidental del cantón Loja* [Tesis de Titulación, Universidad Nacional de Loja]. <https://bit.ly/34u92Aq>
- Jiménez, L. (2006). *Los Geosintéticos Como Solución a La Estabilidad de Taludes* [Tesis de Titulación, Escuela Politécnica del Ejército].
- Jumbo, Y. (2012). *Mapa de zonificación geotécnica de la hoya de Loja* [Tesis de Titulación, Universidad Técnica Particular de Loja].
- Liu, S., Su, Z., Li, M., & Shao, L. (2020). Slope stability analysis using elastic finite element stress fields. *Engineering Geology*, 273. <https://bit.ly/34p8QCI>
- Municipio de Loja. (2014). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Municipio de Loja Fase I: Diagnostico*. <https://bit.ly/3HnQyjC>
- NEC - SE - DS. (2014). *Peligro sísmico: Diseño sismo resistente*. Norma Ecuatoriana de Construcción.
- NEC - SE - GC. (2014). *Geotécnia y Cimentaciones*. Norma Ecuatoriana de Construcción.
- Orellana Campoverde, K. A. (2017). *Análisis de la estabilidad del terreno de la comunidad La Vainilla, Cantón Santa Ana - Provincia de Manabí* [Tesis de Titulación, Universidad Central del Ecuador].
- Quezada, G. (2015). *Susceptibilidad a deslizamientos en la zona de influencia de la vía de integración barrial, desde la ciudadela julio ordoñez hasta el barrio capulí, perteneciente a la ciudad de Loja* [Tesis de Titulación, Universidad Nacional de Loja].
- Reale, C., Xue, J., Pan, Z., & Gavin, K. (2015). Deterministic and probabilistic multi-modal analysis of slope stability. *Computers and Geotechnics*, 66, 172–179. <https://bit.ly/3LBYlwr>
- Reyes, Y. (2019). *Análisis de Estabilidad de Taluses Aplicando Diferentes Técnicas de Revegetalización* [Tesis de Maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].
- Sánchez, K. (2021). *Análisis probabilístico de estabilidad del talud ubicado en el sector El*

Plateado sur de Ecuador, para determinar zonas seguras de construcción [Tesis de Maestría, Universidad Técnica Particular de Loja].

Sánchez, M. (2009). *Modelo de aplicaciones tecnológicas para la protección de taludes desestabilizados por exceso de humedad en el distrito metropolitano de quito a fin de disminuir la accidentalidad y congestión vehicular* [Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Ambato]. <https://bit.ly/34uDslU>

Sharma, R. K. (2015). Reliability Analysis of Slope Stability using Monte Carlo Simulation and Comparison with Deterministic Analysis. *International Conference on Computational Methods*,6.

Suárez, J. (2009). Refuerzo con Geosintéticos. *Deslizamientos: Técnicas de Remediación* (Vol. 2., pp. 211–238). <https://bit.ly/3AWkNfa>