



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA VIAL

Análisis de la variación del factor de seguridad mediante los métodos de equilibrio límite con modelación del software Slide de la ladera ubicado en la parte posterior del Hotel Howard Johnson, sector San Cayetano de la ciudad de Loja

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Jiménez Romero, Diego Michael

DIRECTORA: Esparza Villalba, Carmen Antonieta, M.Sc.

LOJA – ECUADOR

2018



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>

2018

APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Máster

Carmen Esparza Villalba.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación, denominado: Análisis de la variación del factor de seguridad mediante los métodos de equilibrio límite con modelación del software slide de la ladera ubicado en la parte posterior del hotel Howard Johnson, sector San Cayetano de la ciudad de Loja, realizado por Diego Michael Jiménez Romero, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, marzo del 2018

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Diego Michael Jiménez Romero, declaro ser autor del presente de titulación: Análisis de la variación del factor de seguridad mediante los métodos de equilibrio límite con modelación del software slide de la ladera ubicado en la parte posterior del hotel Howard Johnson, sector San Cayetano de la ciudad de Loja, de la Titulación magister en ingeniería vial, siendo Carmen Antonieta Esparza Villalba directora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....
Autor: Jiménez Romero Diego Michael
Cédula: 1900540350

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a Dios, a mi amada esposa e hijo al ser mi apoyo de lucha día a día, a mis padres, hermanos y abuelitos por su cariño.

Diego Michael

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento profundo:

Primeramente a Dios, por regalarme la vida para cumplir cada una de mis metas junto a mi familia.

A la Universidad Técnica Particular de Loja, Escuela de Ingeniería Civil, a sus autoridades administrativas y académicas, quienes me han brindado su apoyo para ampliar mis conocimientos y culminar con esta meta propuesta.

A la MSc. Carmen Esparza Villalba, por su apoyo en todo momento para la culminación de este proyecto de máster.

Diego Michael

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA	i
APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	5
1. Antecedentes	6
1.1. Deslizamiento.....	6
1.2. Tipos de deslizamiento.....	6
1.2.1. Deslizamiento rotacional	7
1.2.2. Deslizamiento traslacional.....	7
1.3. Factores que generan los deslizamientos	8
1.4. Métodos de análisis de estabilidad por equilibrio límite	9
1.5. Características del método de equilibrio límite.....	10
1.6. Métodos de equilibrio límite para la presente investigación	10
1.7. Hidráulica: drenaje y subdrenaje	11
1.8. Estabilización de talud con vegetación	17
CAPÍTULO II. MARCO GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	18
2.1. Localización	19
2.2. Geología.....	20
2.2.1. Geología Regional de la zona	20
2.2.2. Geología local	20
2.3. Topografía.....	21
2.4. Mapa de pendientes.....	23
2.5. Mapa de uso del suelo	23
2.6. Precipitación.....	25
CAPÍTULO III. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.....	27
3. Caracterización geotécnica.....	28
3.1. Sísmica de refracción.....	28
3.2. Perforación.....	31
3.3. Parámetros para modelación	31
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD.....	33
4. Análisis de la estabilidad.....	34
4.1. Tipo de deslizamiento de la ladera Howard Johnson	34
4.2. Determinación del factor de seguridad.....	36
4.2.1. Resultados de los cálculos realizados	36
4.2.2. Medida de estabilización del talud	39

4.2.2.1.	Obras complementarias para estabilización	42
4.2.2.1.1.	Diseño del drenaje superficial y subdrenaje	42
4.2.2.1.2.	Estabilización de talud con vegetación	46
CONCLUSIONES		48
RECOMENDACIONES		50
BIBLIOGRAFÍA		51
ANEXOS		53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Metología utilizada en la modelación del talud	9
Tabla 2.	Métodos en función de la superficie de falla, equilibrio de fuerzas y momentos.	11
Tabla 3.	Especies vegetales utilizadas en estabilización de taludes	17
Tabla 4.	Coordenada de las zonas de estudio	19
Tabla 5.	Rango de pendientes	23
Tabla 6.	Ecuaciones IDF para la Estación la Argelia - Loja	25
Tabla 7.	Intensidades máximas de la Estación La Argelia – Loja	25
Tabla 8.	Resultados sísmica de refracción	30
Tabla 9.	Parámetros elásticos y geotécnicos de sísmica de refracción	30
Tabla 10.	Parámetros físicos y mecánicos para el análisis de la zona de estudio	32
Tabla 11.	Factores de seguridad del talud en estudio – estado natural	36
Tabla 12.	Factor de seguridad para estabilidad global de excavaciones y taludes	38
Tabla 13.	Factores de seguridad del talud – estabilizado	41
Tabla 14.	Variables estadísticas de los FS del Perfil 2	42
Tabla 15.	Determinación de caudales esperados	43
Tabla 16.	Dimensionamiento de cunetas y canales colectores de escorrentía	44
Tabla 17.	Dimensionamiento adoptado para cunetas colectoras de escorrentía	44
Tabla 18.	Verificación de estabilidad de canales colectores de escorrentía	45
Tabla 19.	Diseño de elementos de rugosidad artificial	45
Tabla 20.	Cálculo de caudales recolectados por los subdrenes	46
Tabla 21.	Cálculo del diámetro de tubería perforada	46
Tabla 22.	Detalle de implantación de especies vegetales	47

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.	Borde libre.	13
Ecuación 2.	Borde libre en canal	13
Ecuación 3.	Esfuerzo cortante promedio	14
Ecuación 4.	Esfuerzo cortante en el canal	14
Ecuación 5.	Velocidad permisible de flujo	14
Ecuación 6.	Caudal del subdren	15
Ecuación 7.	Caudal de infiltración	15
Ecuación 8.	Caudal de abatimiento	16
Ecuación 9.	Diámetro de la tubería perforada para el subdren	16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. esquema de un deslizamiento.....	6
Figura 2. deslizamiento rotacional la conchita, en california.....	7
Figura 3. deslizamiento traslacional en talud de vía.....	8
Figura 4. factores que inducen el deslizamiento	8
Figura 5. ejemplo de un análisis de estabilidad de taludes	10
Figura 6. sección típica de cunetas y sus elementos	12
Figura 7. localización de la zona de estudio.....	19
Figura 8. mapa geológico regional de loja escala 1: 100 000	20
Figura 9. afloramiento con presencia de conglomerado (utm: 700269 e, 9558298n).....	21
Figura 10. levantamiento topográfico talud howard johnson	22
Figura 11. raster de elevación generado por interpolación de puntos escala 1:750.....	22
Figura 12. ortofoto de zona de estudio con dron phantom escala 1: 2 000.....	24
Figura 13. mapa de usos de suelo zona de estudio	24
Figura 15. línea sísmica a-a	28
Figura 16. línea sísmica 1 (Is1) - dromocrona	29
Figura 17. velocidades y profundidades calculadas	29
Figura 18. ensayo de sísmica de refracción en zona de estudio.....	30
Figura 19. ensayo spt al pie de la ladera.....	31
Figura 20. modelo de perfil con parámetros físicos y mecánicos del suelo.....	32
Figura 21. identificación de aspectos observados en la ladera de estudio.....	34
Figura 22. presencia de agua en arcillas.....	35
Figura 23. material deslizado al pie del talud	35
Figura 24. perfil 2 - factor de seguridad calculado método de equilibrio límite.....	37
Figura 25. variación del factor de seguridad en condiciones originales del talud.....	37
Figura 26. factor de seguridad vs. mel	38
Figura 27. cambio de geometría del talud - medida de mitigación	40
Figura 28. modelación de la medida de mitigación– perfil 2, se obtiene un fs=1.53	40
Figura 29. talud perfil 2 gráfica de factor de seguridad vs localización	41

RESUMEN

El presente trabajo de fin de titulación analiza la estabilidad de la ladera Howard Johnson ubicado al este de la cuenca de Loja, aledaña a la urbanización Atamer y al Hotel Howard Johnson, infraestructuras que son de gran interés social y económico para nuestra Ciudad.

El análisis corresponde a la variación del factor de seguridad aplicando los métodos de equilibrio límite (**MEL**), considerando los parámetros físico – mecánico de la zona de estudio obtenidos mediante ensayos; haciendo uso de la herramienta avanzada de modelación y cálculo como GPS diferencial, software ArcGis y Slide se obtiene y se analizan la información de los diferentes perfiles en estado original del talud con nivel freático y sin nivel freático, esta modelación se realizó para el plano de falla del programa. Posteriormente al resultado del análisis se determinó a esta ladera como inestable, por consiguiente se propone la medida de mitigación de cambio de geometría del talud y uso de drenes.

Palabras Clave: movimientos de ladera, equilibrio límite, talud, inestable.

ABSTRACT

The present work analyzes the stability of the Howard Johnson slope located to the east of the basin of Loja, bordering to the Atamer neighborhood and the Howard Johnson hotel, infrastructures that are of great social and economic interest for our City.

The analysis corresponds to the variation of the safety factor applying the limit equilibrium methods (MEL), considering the physical-mechanical parameters of the study area obtained by means of tests; making use of the advanced modeling and calculation tool such as differential GPS, ArcGis and Slide software, we obtain and analyze the information of the different profiles in the original state of the slope with water table and without water table, this modeling was done for the failure of the program. Subsequent to the result of the analysis, this slope was determined as unstable, therefore the measurement of mitigation of change of slope geometry and use of drains is proposed.

Keywords: slope movements, limit equilibrium, slope, instability.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la ciudad de Loja es afectada por precipitaciones, las mismas que desencadenan deslizamientos de gran o menor magnitud, produciendo movimiento de masa que ocasiona el colapso de viviendas, vías e infraestructuras de gran interés. En el sector San Cayetano, se encuentra el hotel Howard Johnson perteneciente a una cadena internacional muy prestigiosa y la cual contribuye al turismo a gran escala en nuestra ciudad.

La ladera en estudio presenta un deslizamiento producto de un conjunto de agentes condicionantes a la inestabilidad como lo son los factores intrínsecos que corresponde a la pendiente del terreno y al substrato geológico, mientras que los factores externos que afectan al talud son el clima, la densidad de vegetación y el uso de suelo por parte del ser humano. La falta de medidas de mitigación en este sector hace vulnerable a los habitantes de la urbanización de Atamer y la infraestructura mencionada.

Es necesario hacer énfasis en esta problemática para implementar la medida de corrección para estabilizar y brindar seguridad, por esto se analiza a la ladera "Howard Johnson" mediante el método de equilibrio límite con el software Slide para determinar el factor de seguridad más confiable, basado en la teoría de resistencia al corte de los suelos, al ser los parámetros necesarios para el análisis de estabilidad (Rocscience Slide, 2010).

Los MEL analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable y compara las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen a lo largo de una determinada superficie de rotura. Esta superficie de rotura es teórica, la cual satisface con el criterio de Mohr-Coulomb, obteniendo un factor de seguridad (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes, 2012).

El objetivo general de este estudio fue analizar la variación del factor de seguridad mediante los métodos de equilibrio límite, que se da cumplimiento con los objetivos específicos que fueron:

- Recopilar la información bibliográfica sobre el tema de estudio.
- Recolección de muestras de campo y ensayos de laboratorio del talud en estudio.
- Interpretar y obtener los parámetros morfológicos y geotécnicos.
- Calcular el factor de seguridad con el software Slide para proponer medidas de mitigación.

METODOLOGÍA

- De las diferentes visitas efectuadas al sitio del deslizamiento, adicional a verificar en campo los posibles factores desencadenantes, se realizó ensayos de campo y laboratorio, sísmica de refracción, levantamiento topográfico mediante GPS diferencial y cálculos hidrológicos.
- Con la información obtenida se identificó el tipo de deslizamiento en función del movimiento, permitiendo elegir el posible método de estabilización en base a las características del movimiento.
- Se analizó las capas actuantes en el deslizamiento y la superficie de falla presente en el mismo en base a la sísmica de refracción realizada en la zona, de igual manera se generó siete perfiles que comprende toda la zona inestable.
- Con el programa especializado Slide, por el método de equilibrio límite (MEL) se modeló los perfiles analizando el tipo de material, cohesión y ángulo de fricción, analizando los factores de seguridad (FS) obtenidos en base a las condiciones que se presenten, buscando llegar con la propuesta de mitigación al FS recomendado para un talud estable, para concluir con el análisis de variación del FS del cálculos por los diferentes métodos.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1. Antecedentes

Los deslizamientos se los considera parte de los riesgos naturales, que pueden causar daños socio-económicos al afectar a la población y a su infraestructura; para controlar y mitigar los efectos de los movimientos de ladera, es necesario conocer sus propiedades geológicas, geomecánicas, tipos y mecanismos de inestabilidad, así como los factores que condicionan y desencadenan los movimientos.

El presente capítulo describe los conceptos básicos involucrados con el movimiento de laderas y los métodos de equilibrio límite basado en dovelas para evaluar la zona de falla y determinar el factor de seguridad por métodos iterativos.

1.1. Deslizamiento

Es el movimiento de masa conformada por materiales térreos que se deslizan pendiente abajo por efecto de la gravedad; el material inestable se desliza sobre superficies planas o cóncavas (Gutiérrez Martínez et al., 1996).

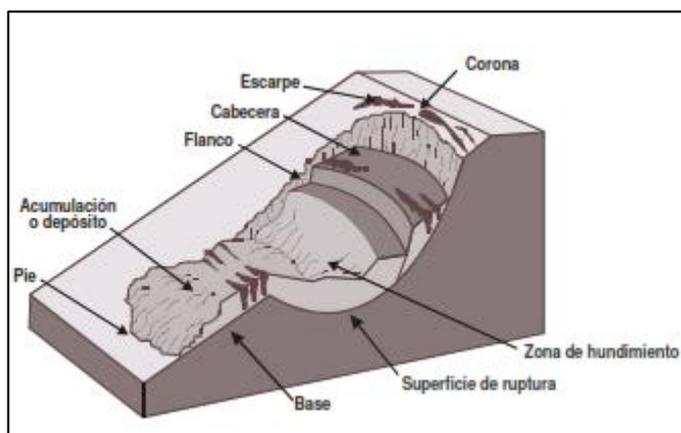


Figura 1. Esquema de un deslizamiento
Fuente: Gutiérrez Martínez et al.
Elaborado por: Gutiérrez Martínez et al.

Therzaghi (1950) define a un deslizamiento como un movimiento rápido de rocas, suelo residual o sedimentos de una ladera, debido a ese movimiento brusco el centro de gravedad de la masa cambio de posición deslizando en el sentido de la pendiente.

1.2. Tipos de deslizamiento

Por la forma del deslizamiento se pueden apreciar dos tipos principalmente: Rotacional y Traslacional.

1.2.1. Deslizamiento rotacional

En este tipo de deslizamiento la superficie de falla resulta cóncava o circular, con movimiento rotacional de las capas de suelo inestable y/o fragmentos de rocas la mayor parte de este tipos de deslizamientos ocurren en suelos arcillosos blandos o rocas blandas (Gutiérrez Martínez et al., 1996).

Los deslizamientos rotacionales se dan en terrenos homogéneos, isotrópicos y cohesivos, ocasionalmente ocurren en la naturaleza en estado puro, pues evolucionan hacia movimientos combinados rápidamente (Simón, 2011).



Figura 2. Deslizamiento rotacional la Conchita, en California
Fuente: Gutiérrez Martínez et al.
Elaborado por: Gutiérrez Martínez et al.

1.2.2. Deslizamiento traslacional

En estos deslizamientos la masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplazan hacia fuera y hacia abajo, siguiendo una superficie principal más o menos planar, con poco o nada de movimiento de rotación o volteo (Gutiérrez Martínez c 1996).

Se presenta en superficies de discontinuidad, con niveles poco competentes, también en bloques tabulares o paquetes de estratos dentro de estructuras conformes de estratificación o esquistosidad o sobre planos de falla o sistemas de diaclasas conformes, cuando están a

favor de la pendiente. Estos deslizamientos pueden involucrar grandes o pequeños volúmenes de material (Simón, 2011).



Figura 3. Deslizamiento traslacional en talud de vía
Fuente: Gutiérrez Martínez et al.
Elaborado por: Gutiérrez Martínez et al.

1.3. Factores que generan los deslizamientos

La relación que existe entre las fuerzas que se pueden originar para que una ladera se vuelva inestable, son las fuerzas motoras o actuantes y las fuerzas que se desarrollan en el interior de la ladera son denominadas fuerzas resistentes, las cuales las mantienen en equilibrio. Siempre y cuando estas fuerzas resistentes sean mayores que las fuerzas motoras o actuantes la ladera se encontrara estable. El peso propio de la ladera y las infraestructuras ubicadas a la corona originan las fuerzas motoras; mientras que la resistencia característica de los materiales que la conforman, originan las fuerzas resistentes (Gutiérrez Martínez et al., 1996).

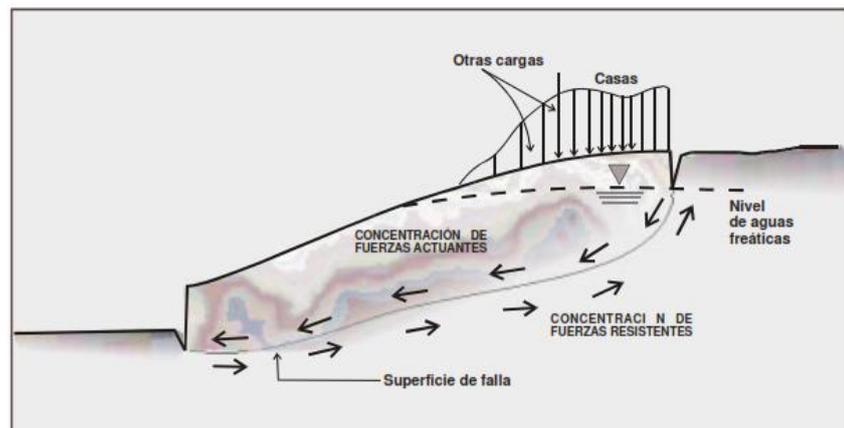


Figura 4. Factores que inducen el deslizamiento
Fuente: Gutiérrez Martínez et al.
Elaborado por: Gutiérrez Martínez et al.

La inestabilidad de la ladera está afectada por factores de tipo interno (intrínsecas) y factores de tipo externo (extrínsecas); los factores internos son aquellos que disminuyen la resistencia de los materiales, estos condicionan los deslizamientos, los mecanismos y modelos de rotura; a diferencia de los factores externos que son los que producen incrementos en la tensión o esfuerzos, modificando las condiciones iniciales de la ladera.

- Características intrínsecas: Concernientes a las propiedades de los materiales, a su resistencia, textura, litología, consolidación, espesor de los materiales y parámetros relativos a planos de estratificación.
- Características extrínsecas: Concernientes a la morfología de la ladera, a la disposición respecto a las discontinuidades geológicas, a factores de tipo ambiental y cambios de vegetación.

Entre los factores externos se destaca los procesos que se relacionan con la modificación de la geometría de la ladera por erosión, excavaciones artificiales, socavación, etc. Las cargas y descargas por efecto de un sismo, vibraciones por explosiones, así como los cambios en el régimen hidrológico como consecuencia de la variabilidad de la intensidad en las precipitaciones. Algunos de estos factores son propiciados por la acción del hombre, es decir modifican sustancialmente la geometría de laderas ocasionando inestabilidad, los efectos de la deforestación modifican la estructura e hidrología del suelo (Gutiérrez Martínez et al., 1996).

1.4. Métodos de análisis de estabilidad por equilibrio límite

De las metodologías disponibles, se puede encontrar los métodos de equilibrio límite, numéricos y los dinámicos para el análisis de caídas de materiales.

El método de equilibrio límite permite analizar las fallas traslacional y rotacional, así como las fallas de inclinación y fallas de cuña (Suárez, 2003). Este método trabaja de manera conjunta con técnicas probabilísticas.

Tabla 1. Metodología utilizada en la modelación del talud

Método	Parámetros Utilizados	Ventajas	Limitaciones
Equilibrio límite	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.

Fuente: Suárez, 2003.
Elaborado por: El autor

1.5. Características del método de equilibrio límite

La característica de este método consiste en determinar si existe la suficiente resistencia en los suelos que conforman el talud para soportar los esfuerzos de cortante que tiende a ocasionar los deslizamientos (Suárez, 2003).

La gran parte de los métodos de análisis supone un criterio de "equilibrio límite" donde el criterio de Mohr-Coulomb satisface a lo largo de una determinada superficie. Se asumen fuerzas actuantes y resistentes en una masa en equilibrio por dichas fuerzas. Calculadas estas resistentes, se compara con las disponibles del material de la ladera y se obtiene un valor del factor de seguridad. Otra forma es dividir la masa en tajadas, dovelas o bloques y se considera el equilibrio de cada elemento por separado. Realizado el análisis de cada elemento se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos como se observa en la figura 5 (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes, 2012).

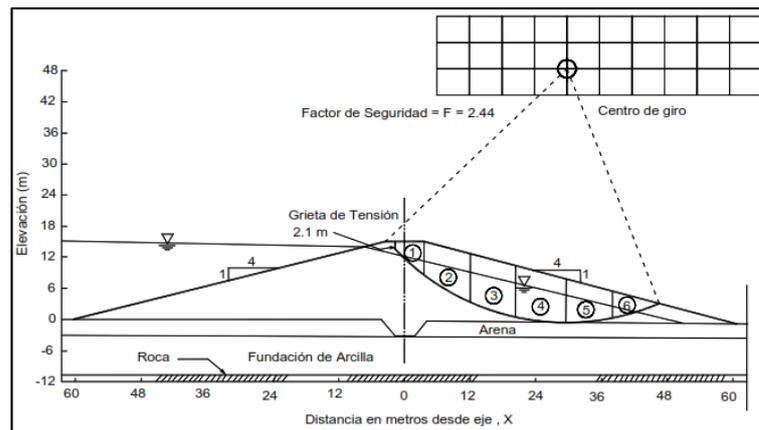


Figura 5. Ejemplo de un análisis de estabilidad de taludes
Fuente: Duncan, 2005.
Elaborado por: Duncan, 2005.

1.6. Métodos de equilibrio límite para la presente investigación

El método de equilibrio límite asume que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalente a un FS= 1, se considera en equilibrio. El análisis se realiza directamente la totalidad de longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en dovelas, asumiendo que el factor de seguridad es igual en todos los puntos.

Algunos autores proponen varios métodos de equilibrio límite, la diferencia el uno del otro es el equilibrio que se tenga en el talud, es decir equilibrio de fuerzas, equilibrio de momentos o la combinación de los dos, así como en el tipo de superficie de falla presente. En la tabla 2 se detallan los métodos de cálculo utilizados y sus características.

Tabla 2. Métodos en función de la superficie de falla, equilibrio de fuerzas y momentos.

Método	Superficie de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius	Circulares	Fuerzas	No considera las fuerzas entre dovelas.
Bishop Simplificado Bishop (1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas son igual a cero.
Janbú Simplificado Janbú (1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y Fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las iguales para cada tajada, pero son desconocidas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas poseen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Morgenstern y Price	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, se asume que varían de acuerdo con una función arbitraria.

Fuente: Suárez, 2003

Elaborado por: Suárez, 2003

1.7. Hidráulica: drenaje y subdrenaje

Entre las alternativas de captación y evacuación de aguas superficiales se pueden mencionar: cunetas de coronación, canales colectores, canales con rugosidad artificial (canales de gran pendiente).

Las técnicas de subdrenaje son uno de los métodos más efectivos para la estabilización de deslizamientos, su aplicación tiene por objeto reducir la presión de poros o impedir que esta aumente, ya que si la presión de poros disminuye, la resistencia del suelo se incrementa. El diseño de sistemas de subdrenaje es algo dificultoso, debido a que la mayoría de los taludes no son homogéneos y que el movimiento del agua en los taludes es irregular y complejo, lo cual hace difícil aplicar principios sencillos en el diseño de obras de subdrenaje. Los subdrenes de zanja constituyen un sistema de tratamiento muy bueno y de costo moderado para deslizamientos poco profundos y con niveles freáticos superficiales.

Los subdrenes deben ser ubicados de tal forma, que intercepten la mayor cantidad de agua. En el caso de bermas, se incluye subdrenajes bajo los canales colectores y las cunetas de coronación; es decir, las líneas de flujo de agua a través de la masa del suelo deben ser captadas en el subdrenaje, con la finalidad de abatir el nivel freático y absorber las aguas producto de la infiltración (Mexichem, 2012).

El sistema de drenaje y subdrenaje debe guardar relación con el diseño geotécnico considerado, a continuación se indican los criterios generales de diseño considerados para los cálculos realizados.

- **Dimensionamiento de canales**

El dimensionamiento de la sección del canal se realiza con la ecuación de Manning, asumiendo una velocidad máxima permisible de 4 m/s y una rugosidad $\eta = 0.020$ para canales conformados con geomembrana de impermeabilización y sacos de suelo – cemento (INVIAS, 2008).

- **Criterio de Velocidad mínima**

La velocidad del flujo debe ser lo suficientemente grande evitar que se produzca sedimentación y obstrucción. El gradiente mínimo está determinado por la mínima velocidad de flujo necesaria para evitar la sedimentación. La velocidad no debe ser menor de 1.3 m/s para el flujo pico. Normalmente la pendiente mínima utilizada es del 1%. La velocidad máxima no debe ser superior a 4 m/s, para evitar el desgaste del recubrimiento y problemas de erosión en suelos reconformados (Chow, 1994).

- **Dimensionamiento del tubo colector del subdrenaje**

La ecuación de Manning permite determinar el diámetro del tubo colector de los subdrenes, el menor diámetro de tubería a ser adoptado es 110 mm, pues para dimensiones menores se podrían dar problemas de obstrucción y disminución de la capacidad hidráulica, lo cual repercutiría en la vida útil y funcionalidad.

a) Sección típica de cunetas

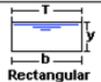
Tipo de sección	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
 <p>Rectangular</p>	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 <p>Trapezoidal</p>	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$

Figura 6. Sección típica de cunetas y sus elementos
 Fuente: Chow, Ven Te (1994). Hidráulica de los canales abiertos
 Elaborado por: El autor

Donde:

A = Área Hidráulica del Canal (m²)

P = Perímetro Mojado del Canal (m)

T = Ancho Superficial del Canal (m)

b = Ancho del Canal (m)

Z = Relación de pendiente de las paredes laterales del canal

y = Altura del agua (m)

R_h = Radio hidráulico

El borde libre se determina mediante la ecuación del U. S. Bureau of Reclamation

$$F = \sqrt{Cy}$$

Ecuación 1.

Donde:

F = Borde Libre (m)

y = profundidad de agua en el canal (m)

C = 1.5 para caudales menores a 20 pies³/s, hasta 2.5 para caudales de hasta 3000 pies³/s.

La siguiente expresión presentada en (DUARTE, 2009), también permite calcular el borde libre de canales.

$$BL = 0.09Q + 0.41 \text{ para } Q \leq 2.3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ecuación 2.

Donde:

BL = Borde libre en (m).

Q = Caudal que transporta el canal en (m³/s).

b) Verificación de estabilidad de los canales

Para determinar la estabilidad de un canal existen dos métodos: (1) la velocidad permisible y (2) la fuerza tractiva (esfuerzo cortante). En el primer método se asume que el canal es estable si la velocidad media es menor que la velocidad máxima permisible, en el segundo método el esfuerzo cortante permisible es el máximo antes que cause erosión del fondo del canal. El método del esfuerzo cortante permisible es el más recomendado cuando se trabaja en el diseño de canales abiertos (Mexichem, 2012).

Cuando el agua fluye en un canal, esta desarrolla una fuerza que actúa en la dirección del flujo sobre el lecho del canal, esta fuerza atractiva es producida por el arrastre del agua sobre el área de contacto.

$$\tau_0 = \gamma R S_0 \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

τ_0 = Esfuerzo cortante promedio, N/m² (lb/ft²)

γ = Peso unitario del agua, 9810 N/m³ (62.4 lb/ft³)

R = Radio Hidráulico, m (ft)

S_0 = Pendiente del fondo del canal o de la línea de energía, m/m (ft/ft)

El esfuerzo cortante máximo se presenta en el fondo del canal (τ_d). Para el proceso de diseño el máximo esfuerzo cortante en el fondo del canal se calcula como:

$$\tau_d = \gamma d S_0 \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

τ_d = Esfuerzo cortante en el canal a la máxima profundidad, N/m² (lb/ft²)

d = Máxima profundidad del flujo en el canal para el caudal de diseño, m (ft)

A partir de la ecuación de continuidad, la relación entre el esfuerzo cortante permisible y la velocidad permisible para un canal revestido puede ser encontrada con la siguiente expresión (Mexichem, 2012):

$$V_p = \frac{K}{n\sqrt{\gamma d}} \quad R^{1/6} \tau_p^{1/2} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde:

V = Velocidad permisible del flujo, m/s (ft/s)

τ_p = Esfuerzo cortante permisible, N/m² (lb/ft²)

K = 1.486 para unidades inglesas y 1.0 para unidades métricas

d = Máxima profundidad del flujo en el canal para el caudal de diseño, m (ft)

c) Diseño de drenaje subterráneo (subdrenes tipo zanja)

La siguiente expresión permite determinar el caudal total colectado por el subdren.

$$Q_{sd} = Q_{nf} + Q_{inf}$$

Ecuación 6.

Donde:

Q_{sd} = Caudal del Subdren

Q_{nf} = Caudal de abatimiento del nivel freático

Q_{inf} = Caudal por infiltración

El caudal debido a la infiltración de la berma o sectores de aporte se evalúa con la siguiente expresión:

$$Q_{Inf} = IxBxLxF_iF_R$$

Ecuación 7.

Donde:

I = Intensidad de precipitación de diseño (m/s)

B = Ancho o reparte aguas de la carretera (m)

L = Longitud del tramo considerado (m)

F_i = Factor de infiltración debido a la superficie

F_R = Factor de retención

Los valores del factor de infiltración dependen de la capa de rodadura; al ser el deslizamiento terreno natural con vegetación se ha asumido un valor de 0,5; el factor de retención recomendado para este tipo de obras es de FR=0.3. En diseños de subdrenes el caudal de infiltración es el dominante, ya que es significativamente mayor que el caudal para el abatimiento del nivel freático (Mexichem, 2012).

Para determinar el caudal de abatimiento del nivel freático se utilizan las siguientes expresiones:

$$\boxed{Q_{nf} = K \times i \times A_o} \quad \boxed{i = \frac{(Nd - Nf)}{B}} \quad \boxed{A_o = (Nd - Nf) \times L} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde:

K = Permeabilidad del suelo (m/s)

I = Gradiente hidráulico (m/m)

A_o= Superficie de contacto bajo el nivel freático (m²)

N_d= Cota inferior del subdren (m)

N_f = Cota superior del nivel freático (m)

Con ayuda de la ecuación de Manning, la ecuación de continuidad, el radio hidráulico de una tubería a sección llena y la ecuación del área de una circunferencia se determina el diámetro de la tubería perforada para los subdrenes.

$$\boxed{Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}} \quad \boxed{\left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right) \frac{D}{4}} \quad \boxed{D = \left[\frac{4^{5/3}}{\pi} Q n S^{-1/2}\right]^{3/8}} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

D = Diámetro de la tubería (m)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning (s/u)

Q = Caudal del subdren (m³/s)

S = Pendiente del fondo del subdren ó de la línea de energía, m/m (m/m)

1.8. Estabilización de talud con vegetación

La revegetación de un talud ayuda a controlar la erosión y aumentar el factor de seguridad. El efecto de la vegetación es una interacción compleja entre factores hidrológicos y mecánicos de difícil cuantificación. El establecimiento de vegetación no es fácil y deben tenerse consideraciones especiales para su diseño, tradicionalmente el proceso de revegetación de taludes se ha concentrado en el uso de pastos olvidándose de los arbustos, hierbas y árboles. Como regla general, nunca debe plantarse una sola especie, sino una sucesión de variedades en tal forma que se recupere el sistema vegetativo original. Se debe considerar además el manejo apropiado de las técnicas de vegetación para ayudar en el proceso natural de sucesión (Suárez, 2009).

El tipo de vegetación que cubre un talud controla su estabilidad; por ejemplo, los deslizamientos de suelo son de 3 a 5 veces más frecuentes en aquellos taludes cubiertos por pastos que en aquellos cubiertos por maleza y arbustos. Los deslizamientos en taludes cubiertos por pasto son más cortos y más anchos y ocurren a ángulos de inclinación menores que en aquellos cubiertos por maleza (Suárez, 2009).

Las especies vegetales deben seleccionarse para que sean compatible con las condiciones del suelo y del sitio (disponibilidad de agua, nutrientes, PH, clima, regulaciones gubernamentales, etc.). La vegetación maderable posee raíces más profundas y más resistentes que las plantas herbáceas y pastos, además provee un mejor refuerzo y efecto de arco (Suárez, 2009).

Tabla 3. Especies vegetales utilizadas en estabilización de taludes

Tipo de vegetación	Especies
Arbóreas	laureles, arupos y sauces
Arbustivas	uvillas, chilca, pumamaqui, e higuera, Tibouchina laxa
Herbáceas	Ageratina dendroides, Calamagrostis macrophylla, cortaderia nítida

Fuente: El autor
Elaborado por: El autor

CAPÍTULO II. MARCO GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Localización

La zona de estudio se ubica dentro de la provincia de Loja, cantón y ciudad del mismo nombre, la cual corresponde a una zona activa de movimiento de masa, forma parte de la urbanización de Atamer y geológicamente se encuentra dentro de la formación San Cayetano. En la tabla 4 y figura 7 se muestra la ubicación exacta con coordenadas de la zona de estudio.

Tabla 4. Coordenada de las zonas de estudio

Talud	Sector	X	Y	Elevación
Ladera Howard Johnson	San Cayetano	700182	9558366	2032

Fuente: El autor
Elaborado por: El autor



Figura 7. Localización de la zona de estudio

Fuente: Google Maps, 2018.

Elaborado por: El autor

2.2. Geología

2.2.1. Geología Regional de la zona

De acuerdo a la carta geológica regional de Loja realizada por el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico del año 2017 escala 1:100.000, la zona de estudio se encuentra ubicada en la formación San Cayetano.

Formación San Cayetano (MSc). (Kennerley, 1973) está constituida por intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas con abundantes restos vegetales y de fauna fósil. Adicionalmente se observan capas de carbón, diatomitas intercaladas con lutitas silíceas grises y calizas con niveles de chert, que han sido discriminadas en el Miembro La Banda.

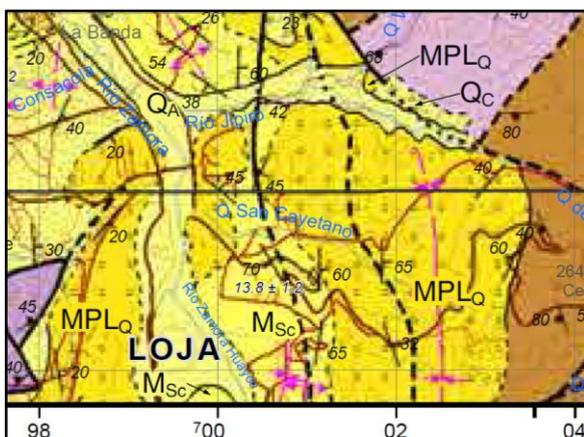


Figura 8. Mapa geológico regional de Loja escala 1: 100 000

Fuente: INIGEMM, 2017

Elaborado por: El autor

2.2.2. Geología local

Localmente la zona de estudio está constituida en su totalidad por la Formación San Cayetano, observando que en la sección nor-oeste existe un deslizamiento que expone a lo largo de la vía los mejores afloramientos, aunque en la zona nor-este también se pueden divisar algunos afloramientos, encontrándonos con conglomerados redondeados a sub-redondeados debido al transporte; su matriz es limo-arenosa a arcillosa de coloración café amarillenta intercalados con capas de arenisca de grano medio con estratificación inclinado como se indica en la figura 9.

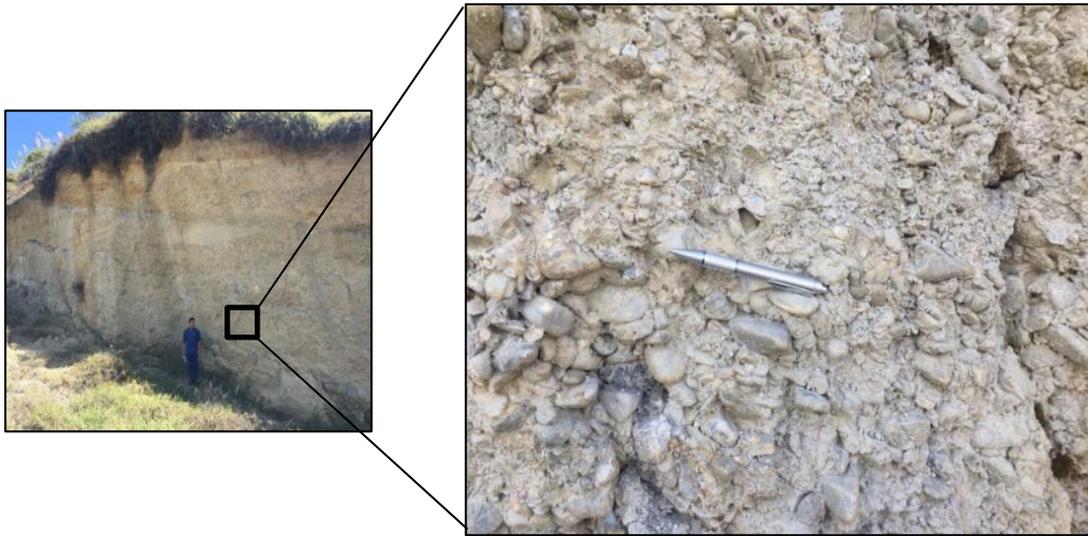


Figura 9. Afloramiento con presencia de conglomerado (UTM: 700269 E, 9558298N)

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Los conglomerados son masivos y pobremente clasificados, los clastos son de origen metamórfico y de tamaño variado (\emptyset promedio 4 cm; \emptyset mayor 12 cm), de forma redondeada a sub-redonda. Anexo II – Lámina 2

2.3. Topografía

La topografía se realizó mediante la utilización del GPS diferencial obteniendo el levantamiento planimétrico y altimétrico de la ladera en estado natural, la primera se refiere a la representación de viviendas, vías, escarpes, cuerpos de agua y grietas de la superficie del terreno, la segunda permitirá relacionar la topografía con la morfología de la zona, así como considerar el factor pendiente, parámetro muy importante dentro del estudio de movimiento de laderas.

La topografía del área de estudio forma diversas colinas, que oscilan entre los 2100 m.s.n.m., hasta los 2145 m.s.n.m. y cubre un área de 15585.75 m². Se definen siete perfiles topográficos a lo largo de toda la ladera para el análisis de su estabilidad. (Anexo 1- lámina 1)

2.4. Mapa de pendientes

El mapa de pendientes fue obtenido en base al mapa topográfico, con el mismo que se procedió a generar un modelo digital de elevación (MDE) a partir de la herramienta correspondiente del software ArcGis 10.1, en la tabla 4 se observa los rangos de pendientes y se deduce que en la ladera el mayor porcentaje (45.21%) corresponde a terrenos fuertes ocupando un área de 7046.6 m² y el de menor porcentaje (0.88%) equivale a terrenos muy suaves ocupando un área de 136.73 m². Anexo II – Lámina 3.

El valor de la pendiente es un condicionante de la estabilidad de la ladera, debido a que de ella dependen las componentes de fuerzas favorables o resistentes al movimiento, que determinan su equilibrio. Así, al aumentar la pendiente aumenta la componente tangencial a la gravedad.

Tabla 5. Rango de pendientes

Categoría	Rango	Área (m ²)	Área (%)
Pendientes planas 	0° - 2°	296.65	1.9
Pendientes muy suaves 	2° - 5°	136.73	0.88
Pendientes suaves 	5° - 12°	847.6	5.44
Pendientes medias 	12° - 25°	1828.44	11.73
Pendientes medias suaves 	25° - 40°	3610.13	23.16
Pendientes fuertes 	40° - 70°	7046.6	45.21
Pendientes muy fuertes 	70° - 100°	1246.75	8.0
Pendientes escarpadas 	>100°	574.33	3.68

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

2.5. Mapa de uso del suelo

La interpretación del uso actual del suelo de la ladera se realizó en base a fotografías aéreas (dron), complementado con visitas de campo.



Figura 12. Ortofoto de zona de estudio con dron phantom
 escala 1: 2 000
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

Algunos tipos de cobertura o usos de suelo, especialmente la vegetación leñosa con sistemas de grandes y fuertes raíces, generan efectos hidrológicos y mecánicos que favorecen la estabilidad de laderas. Debido a esto se comprueba que muchos deslizamientos, se han iniciado en zonas con escasa vegetación, suelos deforestados.

Por lo tanto, en este estudio se ha analizado a través del mapa de usos de suelos, considerándolo como un posible factor condicionante a la susceptibilidad de los deslizamientos. El mapa de usos de suelos de la ladera Howard Johnson fue reclasificado en cuatro clases figura 13, distinguiéndose: chaparros, deslizamiento, eriales, infraestructura vial Anexo II – lámina 4.

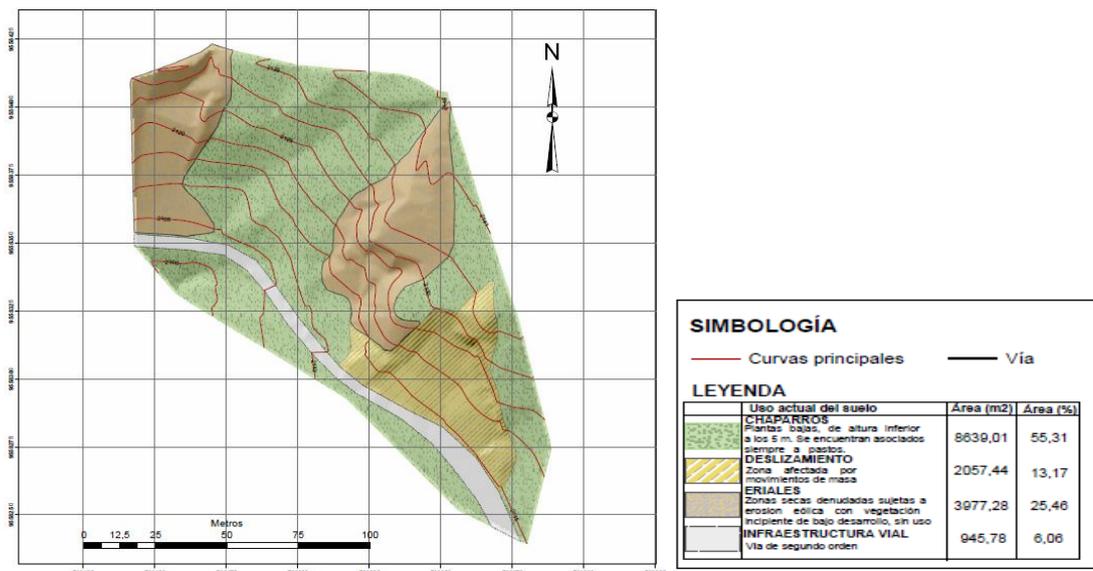


Figura 13. Mapa de usos de suelo zona de estudio
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

2.6. Precipitación

- Precipitación máxima en 24 horas

Se ha considerado para el análisis la información de precipitaciones máximas registradas en la zona de interés, para lo cual se ha tomado como referencia la información de la estación meteorológica La Argelia (INAMHI, 2015).

Tabla 6. Ecuaciones IDF para la Estación la Argelia - Loja

Intervalo de tiempo (Minutos)	Ecuaciones	R	R2
5 < 30	$i = 138.033 \times T^{0.1922} \times t^{-0.4460}$	0.9930	0.9860
30 < 120	$i = 334.481 \times T^{0.1877} \times t^{-0.6954}$	0.9817	0.9637
120 < 1440	$i = 566.052 \times T^{0.1627} \times t^{-0.7978}$	0.9982	0.9964

T (min)	Período de Retorno T(años)					
	2	5	10	25	50	100
5	132.7	158.2	180.8	215.6	246.3	281.4
10	97.4	116.1	132.7	158.2	180.8	206.6
15	81.3	96.9	110.7	132.1	150.9	172.4
20	71.5	85.3	97.4	116.2	132.7	151.6
30	35.8	42.5	48.4	57.5	65.5	74.6
60	22.1	26.2	29.9	35.5	40.4	46.1
120	13.9	16.1	18.1	21.0	23.5	26.3
360	5.8	6.7	7.5	8.7	9.8	10.9
1440	1.9	2.2	2.5	2.9	3.2	3.6

INTENSIDAD MAXIMA (mm/h)

Fuente: INAMHI (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación
Elaborado por: El autor

Tabla 7. Intensidades máximas de la Estación La Argelia – Loja

NOMBRE ESTACIÓN	DURACIÓN	ECUACIÓN
LA ARGELIA-LOJA	5 Min < 44.17 Min	$I_{TR} = 86.811 * Id_{TR} * t^{-0.447} R^2 = 0.9993$
	44.17 Min < 1440 Min	$I_{TR} = 328.11 * Id_{TR} * t^{-0.798} R^2 = 0.9998$

TR (Años)	5	10	15	20	30	60	120	360	1440
2	75.26	55.21	46.06	40.50	33.78	22.26	12.80	5.33	1.76
5	95.98	70.40	58.73	51.65	43.09	28.38	16.33	6.79	2.25
10	109.93	80.64	67.27	59.15	49.35	32.51	18.70	7.78	2.57
25	127.26	93.36	77.88	68.48	57.13	37.64	21.65	9.01	2.98
50	139.95	102.66	85.64	75.31	62.82	41.39	23.80	9.91	3.28
100	153.05	112.28	93.66	82.36	68.71	45.27	26.03	10.83	3.58

Fuente: INAMHI (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación
Elaborado por: El autor

Donde:

ITR = Intensidad de la precipitación para el periodo de retorno considerado (mm/h)

TR = Periodo de Retorno considerado (años)

t = Duración de la precipitación, igual al tiempo de concentración (min)

IdTR = Intensidad diaria para el periodo de retorno considerado (mm/h)

Para el diseño del sistema de drenaje se considera un periodo de retorno de 25 años, con una duración $t = 5$ min (tiempo de concentración) y una $I_{dTR} = 2.9$ mm/h (intensidad diaria para el periodo de retorno considerado), así la precipitación diaria utilizada en la aplicación del método Racional es (69.60 mm = 2.9 mm/h x 24 h).

Como se trata de superficies pequeñas y tiempos de concentración pequeños $t = 5$ minutos, se elige la ecuación de duraciones de 5 min a 44.17 min. Aplicando las ecuaciones de zonificación de intensidades del INAMHI (Tabla 14), se determina que la intensidad de la precipitación para el periodo de retorno considerado ITR es de 122.61 mm/h, comparando este valor con el valor dado por el INAMHI en la Tabla 14 (ITR = 127.6 mm/h), por seguridad se elige el valor mayor.

CAPÍTULO III. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

3. Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica de la ladera consistió en determinar las propiedades y resistencia de los materiales con el objetivo de prevenir futuros problemas a las infraestructuras que se encuentren aledañas a esta zona. Entre los diferentes métodos directos e indirectos existentes, se ha utilizado los siguientes:

- Método Indirecto: Sísmica de refracción.
- Método Directo: Ensayo de Penetración Estándar (SPT).

Estos ensayos se los realizó con la finalidad de obtener información relevante para asignar de forma más objetiva el tipo de suelo y sus parámetros geotécnicos para el cálculo del factor de seguridad.

3.1. Sísmica de refracción

El método sísmico se basa en la propagación de ondas sísmicas producidas artificialmente sobre el terreno, correlacionando con la geología que se tiene del suelo. La propagación depende de la cohesión del tipo de suelo presente en el interior del terreno y de las constantes elásticas. El cambio de las velocidades de las ondas sísmicas define el cambio del material en el interior provocando refracción en cada medio litológico.

En la zona de estudio se realizó un perfil sísmico de 60 m de longitud comprendido desde la corona al pie de la ladera, con el objetivo de obtener los parámetros y propiedades de los suelos.

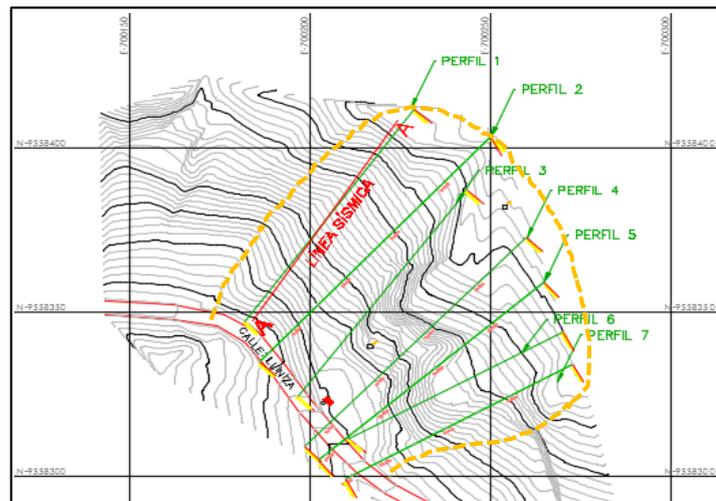


Figura 15. Línea sísmica A-A
Fuente: El autor
Elaborado por: El autor

La sismica de refracción del perfil en estudio se realiza por medio de la línea sísmica con 12 canales a cada 5 m en función de la longitud, con los resultados de campo se procedió al cálculo del perfil sísmico por medio del uso del Software WinSism, usando el método del tiempo de intercepción para obtener las dromocronas, perfil sísmico, interpretación litológica y parámetros elásticos de los suelos y rocas (Figura 16).

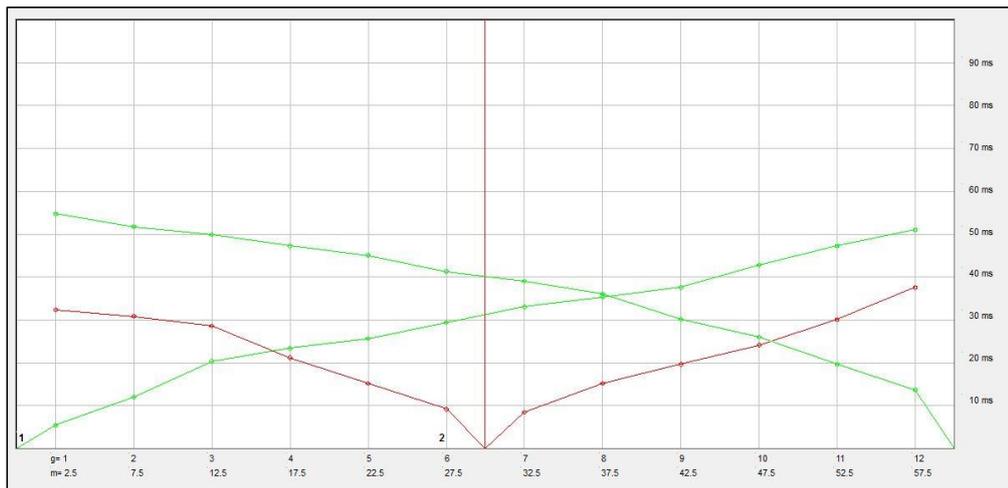


Figura 16. Línea sísmica 1 (LS1) - Dromocrona

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

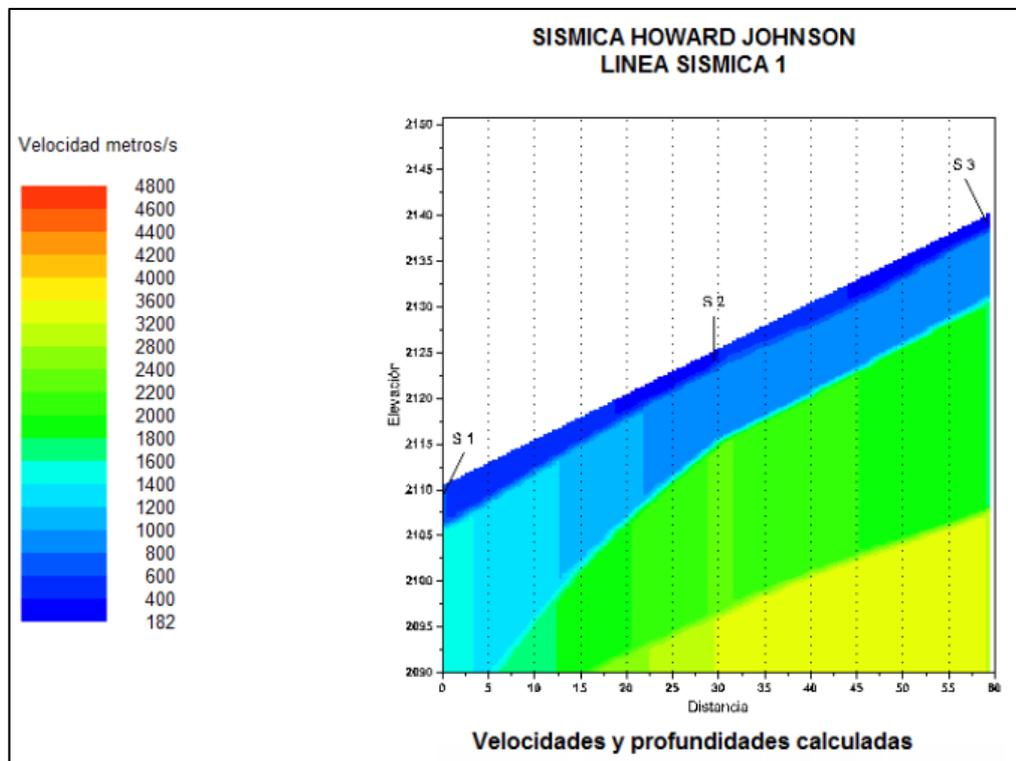


Figura 17. Velocidades y profundidades calculadas

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Los resultados de la interpretación litológica se presentan en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Resultados sísmica de refracción

CAPA	VELOCIDAD SÍSMICA, Ondas P(m/s)	ESPESORES (m)	TIPO DE MATERIAL ESTIMADO
1	180-690	1.25 – 4.10	<i>Cobertura de suelo arcillo limoso, de fino a granular microconglomerado</i>
2	830-1485	8.15-20.00	<i>Arcilla saturada a compacta</i>
3	1890-2280	>10	<i>Arcilla compacta</i>
4	>2300	∞	<i>Lutita</i>

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Tabla 9. Parámetros elásticos y geotécnicos de sísmica de refracción

CAPA SISMICA	Potencia de la capa (m)	Velocidad de onda		μ	γ	Módulo Elásticos			Módulo corte G din (Kg/cm ²)	Cohesión C (Kg/cm ²)	N golpes	Mayerhoff qa (Kg/cm ²)	Uyanick qa (Kg/cm ²)	Dunham \emptyset	Osaki \emptyset
		Vp m/s	Vs m/s			E din (Kg/cm ²)	E est (Kg/cm ²)	E def (Kg/cm ²)							
LS 1															
1	1,25-4.10	385	269	0.02	1.71	2531	1020	116	1239	0.51	3.33	0.33	0.90	2	22
2	8,15-20.0	1074	693	0.14	1.95	21432	11668	595	9371	4.42	22.90	2.29	3.01	42	36
2	>10	2130	1291	0.21	2.17	87378	58002	2680	36115	17.26	52.89	5.29	6.65	45	20

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor



Figura 18. Ensayo de sísmica de refracción en zona de estudio

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

3.2. Perforación

En la zona de estudio se realizaron investigaciones in situ para conocer los problemas geológicos y geotécnicos que se puedan presentar en la ladera, mediante el ensayo SPT realizado una calicata al pie de la ladera a una profundidad de 4 metros se determina que existen arcillas de alta plasticidad y presencia de humedad en las arcillas desde los 2.0 m hasta 2.50 m.



Figura 19. Ensayo SPT al pie de la ladera

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

3.3. Parámetros para modelación

Para el análisis de estabilidad los datos geotécnicos son los que brindan la información necesaria en los estudios de las propiedades físicas de los suelos. Estos datos se los han obtenido de forma directa o indirecta a partir de los resultados de los análisis de laboratorio y del muestreo en campo.

Para la modelación mediante el método de equilibrio límite se determinó 7 perfiles topográficos que representan las diferentes condiciones del terreno.

En la ladera de estudio los resultados del ensayo de sísmica de refracción indican la presencia de tres estratos, la primera capa está conformada por suelo arcillo limoso de fino a granular microconglomerado con un espesor 1.25 a 4.10 m, la segunda capa posee una arcilla saturada compacta de 8.15 a 20 m de espesor y la tercera capa es una arcilla compacta con un espesor mayor a 10 m, además se considera los parámetros de peso específico, cohesión y fricción calculados.

Las características geomecánicas para los 7 perfiles analizados han sido representadas en el software por patrones con sus respectivos colores, se muestra en la tabla 10 y figura 20 los parámetros obtenidos.

Tabla 10. Parámetros físicos y mecánicos para el análisis de la zona de estudio

Material	Color	Peso Unitario (KN/m ³)		Cohesión (KN/m ²)	ángulo de Fricción ϕ
		Húmedo	Saturado		
Arcillo Limoso		20	21.25	50.03	4
Arcilla Saturada		19.12	22	275.66	37
Arcilla Compacta		21.28	23.5	598.41	22

Fuente: El autor
Elaborado por: El autor

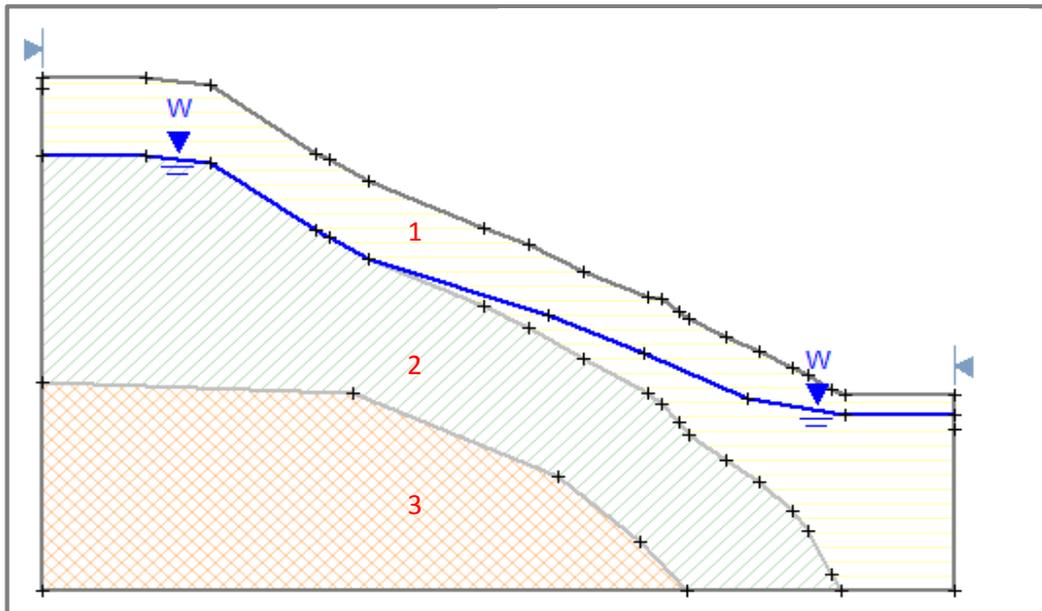


Figura 20. Modelo de perfil en software Slide con parámetros físicos y mecánicos del suelo
Fuente: El autor
Elaborado por: El autor

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD

4. Análisis de la estabilidad

4.1. Tipo de deslizamiento de la ladera Howard Johnson

A lo largo de la zona de estudio se evidencian escarpes, desplazamientos de suelos, suelo removido, planos de rotura, vegetación alterada, así como un afloramiento de agua a nivel de la vía, que es más evidente durante la estación lluviosa. Todos estos aspectos que se observan en el sector, permiten determinar que el deslizamiento suscitado es de tipo traslacional.

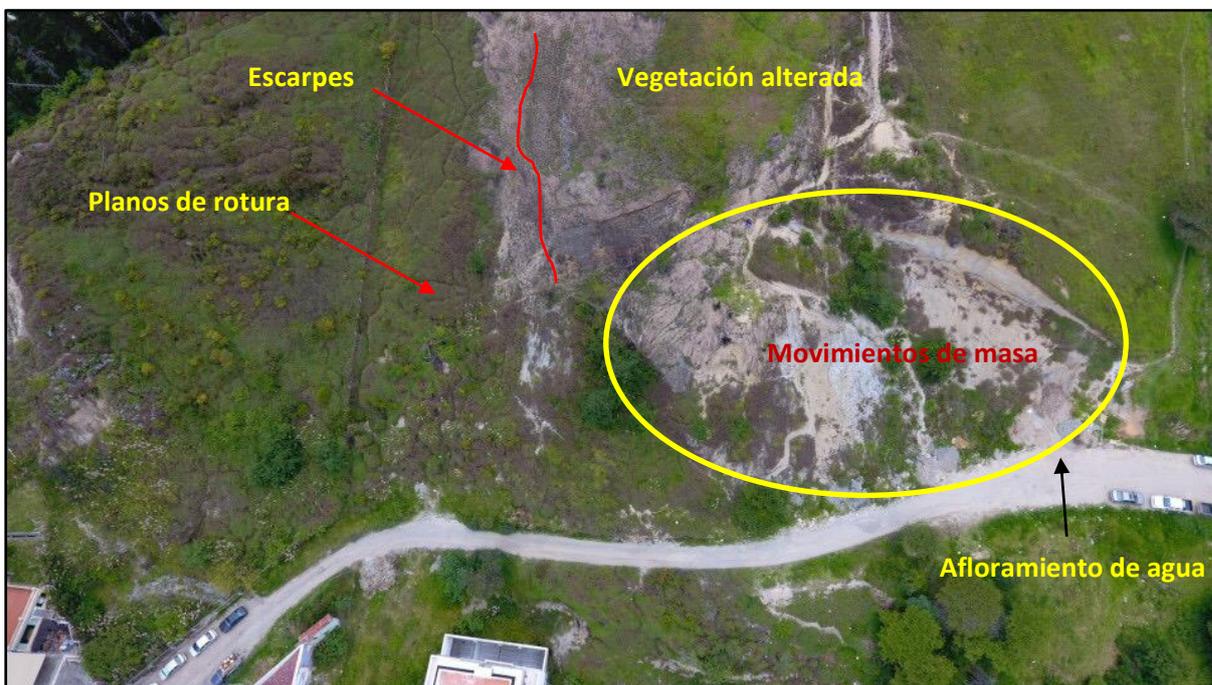


Figura 21. Identificación de aspectos observados en la ladera de estudio.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

Las propiedades del suelo actúan como un factor condicionante al igual que el relieve y la pendiente (2% - 100%). En la capa conformada por arcillas alta plasticidad el factor desencadenante corresponde al factor hidrológico, ya que el exceso de agua produce saturamiento de los materiales, causando la pérdida de resistencia y cohesión, al mismo tiempo que los disgrega y se comporta como una lámina deslizante que debido a la inclinación de la ladera se canaliza a las partes más bajas (Figura 22 y Figura 23).



Figura 22. Presencia de agua en arcillas.

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor



Figura 23. Material deslizado al pie del talud

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

4.2. Determinación del factor de seguridad

Sobre la base de la información de investigación de campo y ensayos para el análisis matemático del problema se han planteado 147 modelos, 7 métodos de cálculo de equilibrio límite por cada perfil, considerando con nivel freático y sin nivel freático en estado natural, por consiguiente de las combinaciones se obtienen 98 factores de seguridad del estado natural y 49 factores de seguridad del estado propuesto.

4.2.1. Resultados de los cálculos realizados

Los cálculos realizados son el resultado de los modelos en el software Slide Versión 6.0, a continuación se describen en la tabla 11.

Tabla 11. Factores de seguridad del talud en estudio – estado natural

DESCRIPCIÓN	MEL						
	ORDINARY/ FELLENIUS	BISHOP	JANBU CORREG.	SPENCER	CORP. ENGINEER 1	LOWE- KARAFIATH	MORGEN -PRICE
PERFIL 1 FS (SNF)	1.17	1.18	1.20	1.18	1.20	1.19	1.18
PERFIL 1 FS (NF)	1.17	1.18	1.21	1.18	1.20	1.19	1.18
PERFIL 2 FS (SNF)	0.88	0.89	0.92	0.89	0.90	0.89	0.89
PERFIL 2 FS (NF)	0.90	0.91	0.93	0.91	0.92	0.91	0.91
PERFIL 3 FS (SNF)	1.11	1.12	1.14	1.11	1.14	1.13	1.11
PERFIL 3 FS (NF)	1.11	1.12	1.14	1.11	1.14	1.13	1.11
PERFIL 4 FS (SNF)	0.77	0.79	0.82	0.78	0.83	0.84	0.78
PERFIL 4 FS (NF)	0.78	0.80	0.83	0.80	0.84	0.84	0.80
PERFIL 5 FS (SNF)	0.94	0.95	0.99	0.96	0.99	0.97	0.95
PERFIL 5 FS (NF)	0.96	0.97	1.00	0.97	1.00	0.99	0.97
PERFIL 6 FS (SNF)	1.13	1.14	1.18	1.14	1.19	1.25	1.15
PERFIL 6 FS (NF)	1.13	1.14	1.18	1.15	1.19	1.25	1.15
PERFIL 7 FS (SNF)	1.15	1.16	1.18	1.16	1.20	1.19	1.16
PERFIL 7 FS (NF)	1.16	1.17	1.19	1.17	1.20	1.19	1.17

Fuente: El autor

Elaborado por: El autor

De los resultados analizados se evalúa el perfil 2 por encontrarse en la zona más crítica del deslizamiento de la ladera, así como se indica en la tabla 9 posee un FS= 0.89. En la figura 24 se visualiza el plano de falla calculado por el programa y se corrobora con el plano de falla identificado en campo, en donde se ve claramente que esta falla está en la capa superficial de arcillo limoso.

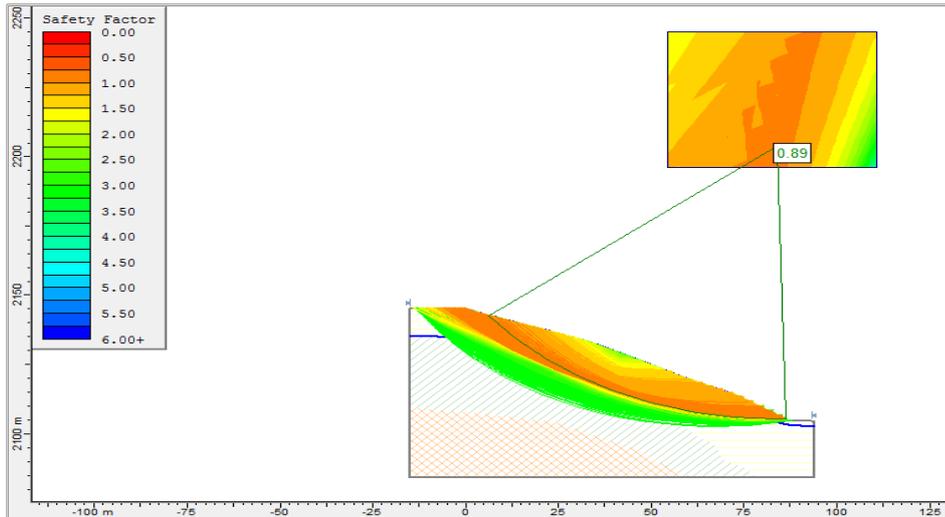


Figura 24. Perfil 2 - Factor de seguridad calculado en base al método de equilibrio límite.
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

Del análisis el factor de seguridad en el perfil 4 y perfil 5 presenta resultados de 0.78 y 0.95 respectivamente, esto ocurre debido a que se modela la zona donde existe movimiento de masa activa y existe la presencia de agua en las arcillas; a diferencia de los perfiles 1, 3, 6 y 7 que poseen un factor de seguridad mayor a la unidad considerándolos más estables, por cuanto se ubican en un sitio de movimiento de masa lento.

En la figura 25 del perfil 2 se observa la variación del factor de seguridad a lo largo del perfil, identificando los valores más altos entre la longitud de 25 m a 55 m del perfil en sus cotas 2136 m.s.n.m a la 2122 m.s.n.m respectivamente, mientras que los valores más bajos se encuentra entre las longitudes de 0 a 25 m y 55 a 83 m debido a la saturación del terreno en ciertas cotas. Esto indica las zonas con mayor inestabilidad en el perfil y propensas a deslizamientos por estar cerca del límite de equilibrio.

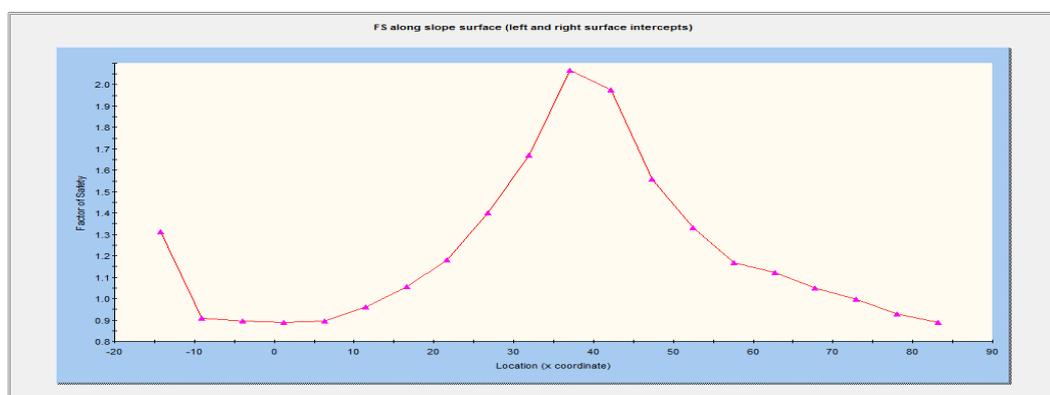


Figura 25. Variación del factor de seguridad en condiciones originales a lo largo del talud.
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

De la tabla 11 se realizó una gráfica de dispersión de datos del Perfil 2, en la que se analiza el factor de seguridad vs. los métodos de equilibrio límite con nivel freático (NF) y sin nivel freático (SNF), interpretando estos resultados se observa que los valores de factor de seguridad por los métodos de Bishop, Spencer, Lowe-Karafiath y Morgenstern – Price se aproximan a la línea de tendencia, esto sucede porque los métodos descritos satisfacen el equilibrio de momentos como se muestra en la figura 26.

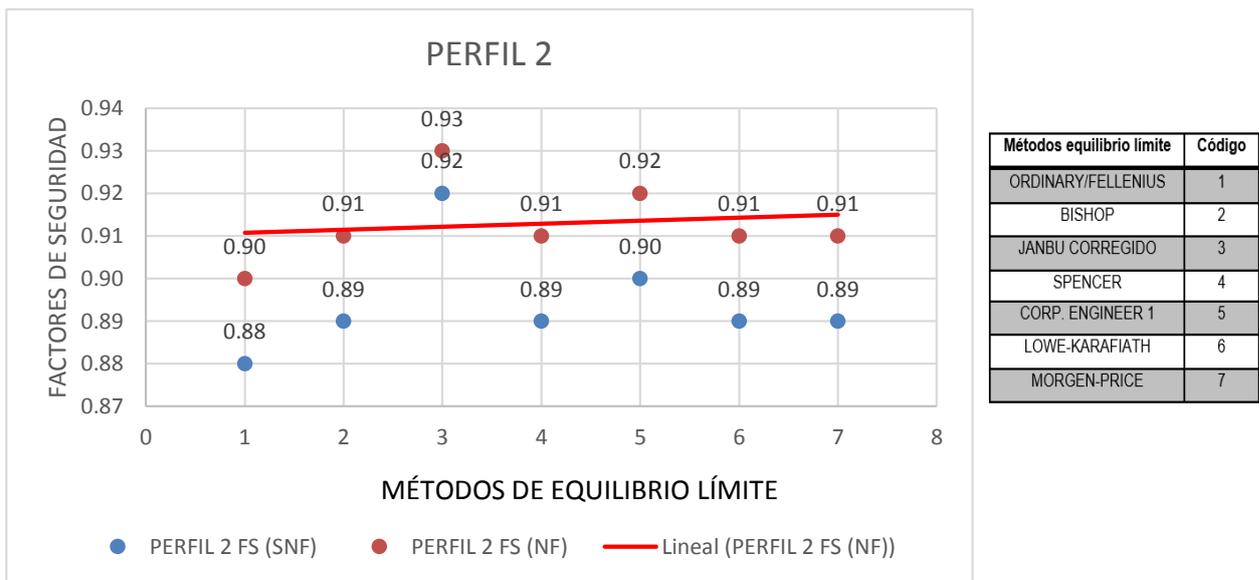


Figura 26. Factor de seguridad Vs. MEL
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

Del análisis de estabilidad de la zona de estudio por los diferentes métodos de equilibrio límite se determinó a la ladera inestable al haber obtenido factores de seguridad menores a 1.17. Por consiguiente se establece la medida de mitigación para estabilizar la ladera cumpliendo con la normativa ecuatoriana de la construcción. (NEC-SE-CM, 2015)

Tabla 12. Factor de seguridad mínimos para estabilidad global de excavaciones y taludes

Condición	FS _{corte} Mínimo	
	Diseño	Construcción
Taludes – condición estática y Agua subterránea Normal	1.5	1.25
Taludes – condición estática con agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de diseño	1.05	1.00

Fuente: Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-CM 2015
 Elaborado por: Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-CM 2015

4.2.2. Medida de estabilización del talud

Para la estabilización del deslizamiento de ladera el diseño geotécnico está basado en la reconformación de la superficie del talud (geometría), esta es una de las técnicas más utilizadas en la estabilización de taludes y consiste en modificar la forma de la superficie del talud para lograr un equilibrio de masas e incrementar el factor de seguridad en la zona. Las obras consideradas incluyen: trabajos de disminución de la pendiente, construcción de bermas y el corte parcial de la corona del talud.

El corte parcial de la corona del talud, permitirá reducir las fuerzas actuantes dentro de la masa deslizada. La construcción de terrazas (bermas) en las partes altas de un deslizamiento de traslación, tienden a reducir el momento actuante y controlar el movimiento del suelo. El efecto combinado de estas dos técnicas permite disminuir las fuerzas actuantes en la zona más crítica para la generación de momentos desestabilizantes.

Para captar y conducir el escurrimiento superficial y subterráneo de las aguas, se implementará un sistema de drenaje compuesto por cuneta de coronación, canales colectores y un subdren tipo zanja, el cual descargará las aguas captadas al sistema de alcantarillado pluvial. La pendiente de la cuneta de coronación, canales colectores y subdrenes se acoplará a la topografía, los canales colectores tendrán geometría rectangular y trapezoidal, las dimensiones se calcularán en función de los caudales esperados. Los materiales elegidos para su construcción son suelo-cemento, geomembrana y hormigón armado.

La cuneta de coronación y los canales colectores de las bermas tendrán una forma trapezoidal, serán excavados en el terreno, las paredes y la solera se conformarán con sacos de suelo-cemento (relación de 6 a 1 en peso), e irán revestidos con una geomembrana de Polietileno de Alta Densidad GHDPE150-LN ($e = 1.35 \text{ mm}$) de impermeabilización, para evitar las infiltraciones de agua hacia el subsuelo, la rugosidad de Manning adoptada para este material $n = 0.020$, lo cual permitirá conformar un canal impermeable y flexible que se acomode a movimientos que pueda sufrir el terreno (INVIAS, 2009). El drenaje subterráneo se realizará con un subdren de zanja a lo largo de la vía, de sección rectangular de 2.15 m de altura y 0.80 m de ancho, el filtro estará conformado con material granular triturado de 1 pulgada (2.54 cm), envuelto en geotextil NT1800 e incluirá tubería perforada de 200 mm (Anexo 5 – lámina 2 y 3).

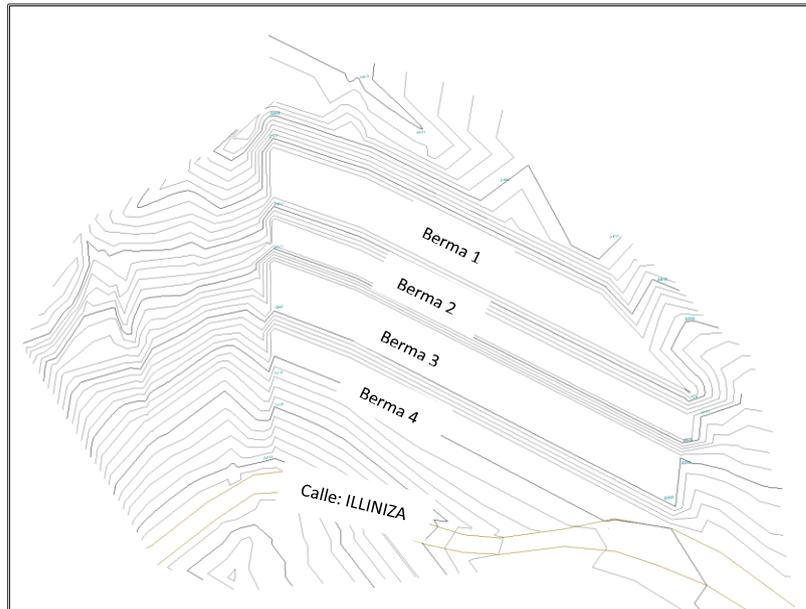


Figura 27. Cambio de geometría del talud - medida de mitigación
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

Para el análisis del factor de seguridad implementada la medida de mitigación se modeló en el programa Slide nuevamente los 7 perfiles con los 7 métodos de equilibrio límite y los parámetros geotécnicos descritos en el capítulo 3 tabla 10.

En la figura 28 analizado el Perfil 2 considerado como más crítico con la reconfiguración de la geometría del talud se obtuvo un factor de seguridad mayor a 1.5, lo que se garantiza la estabilidad de la ladera, además se complementó con obras hidráulicas para evacuar las aguas lluvias y evitar las filtraciones.

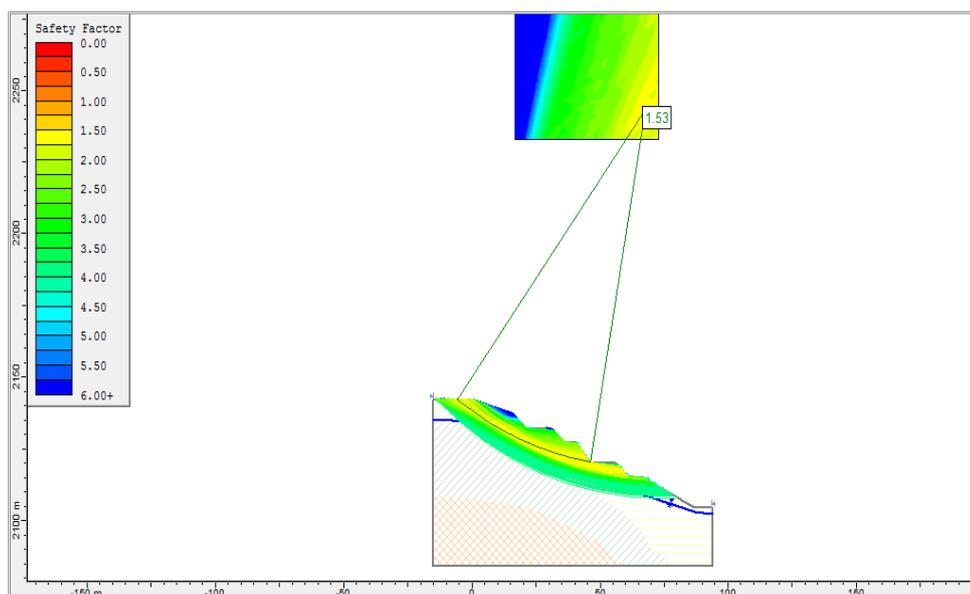


Figura 28. Modelación de la medida de mitigación– Perfil 2, se obtiene un FS=1.53
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

La figura 29 describe el factor de seguridad mayor a 1.5 a lo largo de todo el perfil, razón por la que se considera al talud estable.

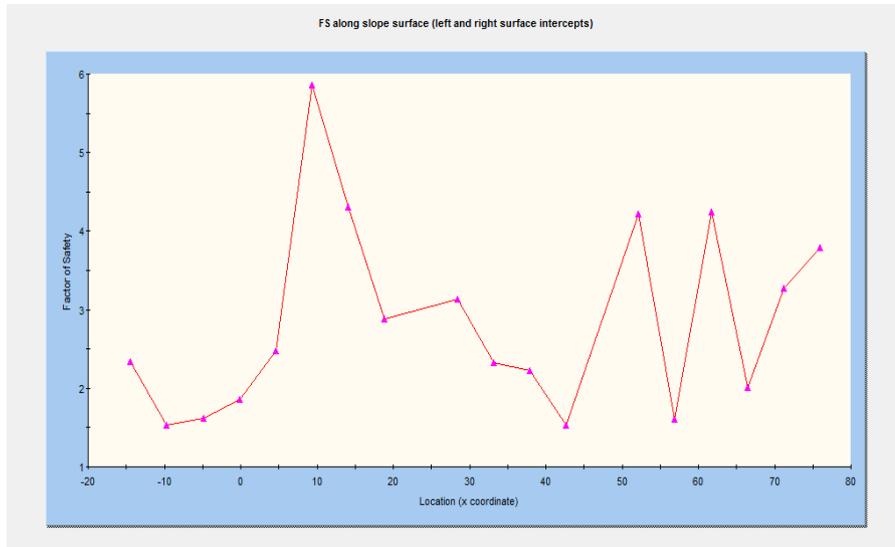


Figura 29. Talud Perfil 2 Gráfica de factor de seguridad vs Localización
 Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

Los factores de seguridad del talud estabilizado se presentan en la Tabla 13, la cual contiene los resultados de los 7 perfiles analizados por Slide.

Tabla 13. Factores de seguridad del talud – estabilizado

DESCRIPCIÓN	MEL						
	ORDINARY/ FELLENIOUS	BISHOP	JANBU CORREG.	SPENCER	CORP. ENGINEER 1	LOWE- KARAFIAT H	MORGEN- PRICE
PERFIL 1 FS E	1.58	1.59	1.52	1.59	1.64	1.62	1.59
PERFIL 2 FS E	1.53	1.53	1.53	1.54	1.54	1.54	1.54
PERFIL 3 FS E	1.63	1.63	1.61	1.63	1.65	1.64	1.63
PERFIL 4 FS E	1.56	1.56	1.53	1.57	1.58	1.57	1.57
PERFIL 5 FS E	1.66	1.67	1.66	1.66	1.68	1.67	1.66
PERFIL 6 FS E	1.57	1.57	1.54	1.57	1.61	1.59	1.57
PERFIL 7 FS E	1.50	1.50	1.49	1.50	1.51	1.51	1.50

Fuente: El autor
 Elaborado por: El autor

Los métodos de Spencer y Morgenstern – Price corroboran con la bibliografía, que al ser métodos precisos se obtienen valores de factor de seguridad iguales en todos los 7 perfiles de la ladera.

Los factores de seguridad obtenidos por el método de Bishop difieren aproximadamente en 1% con respecto a los valores obtenidos con los métodos Spencer y Morgenstern – Price en los perfiles 2 – 4 y 5, mientras que los valores obtenidos por el método de Janbú subestima el factor de seguridad.

Estabilizado en la tabla 14 se muestra el análisis estadístico del FS del Perfil 2 en estado natural FS (SNF) y del FS (Es) del estado propuesto calculados por 7 métodos de equilibrio límite que describe: el valor promedio del estado actual del FS (SNF) es de 0.89 y del FS (Es) es de 1.53 con una variación estándar de 0.01 y 0.005 respectivamente. Esto significa que existe una mayor dispersión de datos en los valores obtenidos por el FS (SNF) a relación de los valores obtenidos por el FS (Es). Además la relación de incremento del FS entre el FS (Es) y del FS (SNF) es del 70%, de acuerdo a este resultado se garantiza la propuesta de mitigación para la ladera.

Tabla 14. Variables estadísticas de los FS del Perfil 2

PERFIL # 2			
MÉTODOS	FS (SNF)	FS (NF)	FS Es.
ORDINARY/FELLENIOUS	0.88	0.90	1.53
BISHOP	0.89	0.91	1.53
JANBU CORREG.	0.92	0.93	1.53
SPENCER	0.89	0.91	1.54
CORP. ENGINEER 1	0.90	0.92	1.54
LOWE-KARAFIATH	0.89	0.91	1.54
MORGEN-PRICE	0.89	0.91	1.54
<i>Media:</i>	0.89	0.91	1.54
<i>Desviación Estándar:</i>	0.01	0.01	0.005

Fuente: El autor
Elaborado por: El autor

4.2.2.1. Obras complementarias para estabilización

4.2.2.1.1. Diseño del drenaje superficial y subdrenaje

El objetivo principal del drenaje superficial es mejorar la estabilidad del talud reduciendo la infiltración y evitando la erosión en zonas donde existe poca vegetación, los sistemas de recolección de aguas superficiales deben captar la escorrentía producto de las precipitaciones hacia lugares seguros lejos del sitio que se pretende estabilizar. Es importante captar las aguas de escorrentías antes de que alcance el área del deslizamiento, lo cual se consigue mediante la construcción de cunetas de coronación.

a) Cálculo de los caudales esperados

El cálculo de caudales se realiza en función de las ecuaciones del apartado 1.7 drenaje y subdrenaje y 2.6 precipitación, para determinar los caudales esperados de la zona de estudio (Tabla 15).

Tabla 15. Determinación de caudales esperados

Cálculo del tiempo de concentración					
Estructura	Hs	Hi	ΔH (m)	Longitud (m)	Tc (min)
CC	2146.00	2131.00	15.00	129.15	1.89
C1	2133.00	2132.00	1.00	118.84	4.86
C2	2126.50	2125.00	1.50	139.00	4.98
C3	2120.50	2118.50	2.00	132.74	4.23
C4	2116.00	2115.00	1.00	104.03	4.17
C5	2131.00	2124.00	7.00	28.12	0.43
C6	2124.00	2115.00	9.00	32.84	0.47
C7	2115.00	2103.35	11.65	164.83	2.76

Intensidad de precipitación para periodo de retorno considerado			
Intensidad diaria para TR	$I_{dTR} =$	2.90	mm/h
Tiempo de concentración	$t =$	5.00	minutos
Periodo de retorno considerado	$TR =$	25	años
Intensidad precipitación para TR	$I_{TR} =$	122.61	mm/h
Intensidad precipitación para TR	$I_{TR} =$	127.60	mm/h
Intensidad precipitación para TR	$I_{TR} =$	127.60	mm/h

Cálculo de caudales máximos esperados para canales colectores						
Estructura	Tramo	Aportes	Área (m ²)	Área (ha)	C	Q (m ³ /s)
CC	P1-P2	Área 1	8420.00	0.84	1.00	0.30
C1	P6-P2	Área 2	3573.00	0.36	1.00	0.13
C2	P7-P3	Área 3	1226.00	0.12	1.00	0.04
C3	P8-P4	Área 4	1823.00	0.18	1.00	0.06
C4	P9-P10	Área 5	1132.00	0.11	1.00	0.04
C5	P2-P3	Área 6	1472.00	0.15	1.00	0.05
C5	P2-P3	CC				0.30
C5	P2-P3	C1				0.13
C6	P3-P5	Área 7	930.00	0.09	1.00	0.03
C6	P3-P5	C2				0.04
C6	P3-P5	C3				0.06
C6	P3-P5	C5				0.48
C7	P5-P11	Área 8	1606.00	0.16	1.00	0.06
C7	P5-P11	C4				0.04
C7	P5-P11	C6				0.62

Fuente: INAMHI (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades de precipitación

Elaborado por: El autor

b) Dimensionamiento de canales colectores de escorrentía superficial

Tabla 16. Dimensionamiento de cunetas y canales colectores de escorrentía

Rugosidad de Manning	n =	0.020	s/u	Geomembrana
Rugosidad de Manning	n =	0.013	s/u	Hormigón
Pendiente de paredes	Z =	0.60	m/m	Trapezoidal
Pendiente de paredes	Z =	1.00	m/m	Rectangular
Coeficiente capacidad	C =	1.50	s/u	
Peso específico agua	Y =	9810.00	N/m ³	

Dimensionamiento de canales de recolección de escorrentías superficiales									
Estructura	Tramo	Q (m ³ /s)	So (m/m)	b (m)	y (m)	F (m)	BL (m)	H (m)	V (m/s)
CC	P1-P2	0.30	0.19	0.50	0.12	0.43	0.44	0.55	4.32
C1	P6-P2	0.13	0.02	0.50	0.14	0.46	0.42	0.58	1.52
C2	P7-P3	0.04	0.02	0.50	0.07	0.33	0.41	0.45	1.08
C3	P8-P4	0.06	0.02	0.50	0.09	0.38	0.42	0.49	1.23
C4	P9-P10	0.04	0.02	0.50	0.07	0.33	0.41	0.44	1.04
C5	P2-P3	0.48	0.27	0.50	0.13	0.43	0.45	0.57	7.63
C6	P3-P5	0.62	0.29	0.50	0.15	0.47	0.47	0.61	8.46
C7	P5-P11	0.72	0.07	0.50	0.27	0.64	0.47	0.83	5.24

Fuente: Chow, Ven Te (1994). Hidráulica de los canales abiertos

Elaborado por: El autor

Por facilidades constructivas y atendiendo a las recomendaciones indicadas en (INVIAS, 2009), se adoptan las dimensiones indicadas en la Tabla 17.

Tabla 17. Dimensionamiento adoptado para cunetas colectoras de escorrentía

Características de Canales Colectores							
Estructura	Tramo	b (m)	H (m)	T(m)	Z	Forma	Material
CC	P1-P2	0.50	0.60	0.64	0.60	Trapezoidal	Geomembrana
C1	P6-P2	0.50	0.60	0.67	0.60	Trapezoidal	Geomembrana
C2	P7-P3	0.50	0.50	0.59	0.60	Trapezoidal	Geomembrana
C3	P8-P4	0.50	0.50	0.61	0.60	Trapezoidal	Geomembrana
C4	P9-P10	0.50	0.50	0.59	0.60	Trapezoidal	Geomembrana
C5	P2-P3	0.50	0.60	0.50	1.00	Rectangular	Hormigón
C6	P3-P5	0.50	0.65	0.50	1.00	Rectangular	Hormigón
C7	P5-P11	0.50	0.90	0.50	1.00	Rectangular	Hormigón

Fuente: INVIAS, 2009. Manual De drenaje para carreteras del INVIAS

Elaborado por: El autor

c) Verificación de estabilidad de los canales

Tabla 18. Verificación de estabilidad de canales colectores de escorrentía

Estructura	Tramo	So (m/m)	y (m)	R(m)	τ_o (N/m ²)	τ_d (N/m ²)	Vp (m/s)	Verificación
CC	P1-P2	0.19	0.12	0.09	164.70	224.82	14.55	Cumple
C1	P6-P2	0.02	0.14	0.10	19.63	27.89	4.82	Cumple
C2	P7-P3	0.02	0.07	0.06	11.74	14.50	4.42	Cumple
C3	P8-P4	0.02	0.09	0.07	14.29	18.49	4.57	Cumple
C4	P9-P10	0.02	0.07	0.06	11.36	13.94	4.40	Cumple
C5	P2-P3	0.27	0.13	0.08	220.87	331.40	26.42	Cumple
C6	P3-P5	0.29	0.15	0.09	262.44	415.92	27.85	Cumple
C7	P5-P11	0.07	0.27	0.13	89.63	187.56	14.50	Cumple

Fuente: Mexichem, 2012. Manual y software de diseño con Geosintéticos Geosof Pavco

Elaborado por: El autor

d) Diseño de elementos de rugosidad artificial

Pese a que la velocidad media de los canales no sobrepasa la velocidad permisible, se debe incluir elementos de rugosidad artificial en los canales 5, 6 y 7 para cumplir con el criterio de la velocidad máxima, estos elementos permitirán disminuir la velocidad del agua, lo cual garantizará la vida útil de las obras. Los elementos de rugosidad consisten en vigas de hormigón de (5.0 x 10.0 x 50.0) cm, colocadas transversalmente en el fondo del canal con una separación de 1 m, además entre vigas se colocara piedra bola embebida en la solera del canal ($\Phi_{max} = 15$ cm).

Tabla 19. Diseño de elementos de rugosidad artificial

Altura de la rugosidad	$\sigma =$	0.05	m
Coeficiente rugosidad	$k_1 =$	47.5	s/u
Coeficiente rugosidad	$k_2 =$	-1.2	s/u
Coeficiente rugosidad	$k_3 =$	0.1	s/u
Valor mínimo de C	$C_{min} =$	21.88	s/u
Valor máximo de C	$C_{max} =$	25.38	s/u

Estructura	Tramo	b (m)	h (m)	C (calculado)	C (asumido)	Θ (rad)	V (m/s)
C5	P2-P3	0.50	0.08	2.16	21.88	0.26	3.23
C6	P3-P5	0.50	0.10	2.19	21.88	0.28	3.51
C7	P5-P11	0.50	0.22	2.36	21.88	0.07	2.09

Fuente: Chow, Ven Te (1994). Hidráulica de los canales abiertos

Elaborado por: El autor

e) **Diseño de drenaje subterráneo (subdrenes tipo zanja)**

Tabla 20. Cálculo de caudales recolectados por los subdrenes

Intensidad de precipitación	I =	0.000035	m/s
Factor de infiltración	Fi =	0.50	s/u
Factor de retención	FR =	0.30	s/u
Permeabilidad suelo superficial	K =	0.000025	m/s
Cota inferior del subdren	Nd =	3.50	m
Cota del nivel freático	Nf =	3.25	m

Estructura	Tramo	Aportes	B(cm)	L(cm)	Qinf (m3/s)	Qnf (m3/s)	Qsd (m3/s)
Subdren CC	P5-P11	A total	110.00	164.83	0.0964	0.000002	0.0964

Fuente: El autor
Elaborado por: El autor

Con ayuda de la ecuación de Manning, la ecuación de continuidad, el radio hidráulico de una tubería a sección llena y la ecuación del área de una circunferencia se determina el diámetro de la tubería perforada para los subdrenes.

Tabla 21. Cálculo del diámetro de tubería perforada

Rugosidad de Manning	n =	0.012	s/u
----------------------	-----	-------	-----

Estructura	Tramo	Qsd (m3/s)	So (m/m)	D (m)	D (mm)
Subdren CC	P5-P11	0.0964	0.07	0.20	200.00

Estructura	Tramo	Qsd (m3/s)	So (m/m)	D (m)	D (mm)
Subdren CC	P5-P11	0.0964	0.07	0.20	200.00

Tipo de subdrenes y dimensiones					
Estructura	Tramo	Subdren	Ancho (m)	Altura (m)	D (mm)
Subdren CC	P5-P11	Tipo A	0.80	2.15	200.00

Fuente: Chow, Ven Te (1994). Hidráulica de los canales abiertos
Elaborado por: El autor

4.2.2.1.2. Estabilización de talud con vegetación

Las condiciones topográficas, geotécnicas, climatológicas, hidrológicas y paisajísticas del sector, son determinantes en la selección de las especies que se utilizarán en un proyecto de revegetación encaminado a estabilizar el talud. Considerando estos aspectos determinantes y con la ayuda de un Ingeniero Forestal, se ha considerado que una alternativa biotecnológica para estabilizar el talud afectado, sería la siembra de especies arbóreas y herbáceas en el extremo norte del terreno, en el sector del talud conformado se sembraría especies arbustivas y herbáceas.

La siembra de especies arbóreas se debe hacer siguiendo las curvas de nivel, las plántulas deben ir intercaladas cada 4 m, las semillas de las especies arbustivas y herbáceas se sembrarán esparciendo las semillas sobre la capa superficial del suelo, conforme esta capa sea reconfirmada, la capa de suelo superficial será fertilizada con abono orgánico. El detalle de la implantación de estas especies se indica en la Tabla 23 y en el anexo 4 – lámina 4 se detalla la siembra de especies vegetales.

Tabla 22. Detalle de implantación de especies vegetales

Implantación de especies vegetales			
Tipo	Cota inicio (m)	Cota final (m)	Área (m²)
Sauce	2,104.00	2,110.80	890.00
Arupo	2,110.80	2,120.50	996.00
Laurel	2,120.50	2,142.00	2,085.00
Arbustivas	2,105.00	2,150.00	12,172.43
Herbáceas	2,104.00	2,150.00	16,143.43
Fertilizante	2,104.00	2,150.00	16,143.43

Tipo arbóreo	Área	U/16 m²	Plantas (U)
Sauce	890.00	4.00	234.00
Arupo	996.00	4.00	262.00
Laurel	2,085.00	4.00	548.00

Tipo	Área	kg/m²	Semillas (kg)
Arbustivo	12,172.00	0.02	251.00
Herbáceo	16,143.00	0.02	333.00

Tipo	Área	kg/m²	Cantidad (kg)
Fertilizante	16,143.00	0.10	1,663.00

Fuente: El autor
Elaborado por: El autor

CONCLUSIONES

- En la ladera de estudio los factores que han favorecido para su inestabilidad fueron su litología al estar conformada por tres estratos: su primera capa de suelo arcillo limoso con intercalaciones de microconglomerado de fino a granular, la segunda capa posee una arcilla saturada compacta y la tercera capa es una arcilla compacta, seguido de las precipitaciones, pendientes fuerte y uso actual del suelo.
- El levantamiento topográfico realizado comprende un área de 1.56 ha donde las cota más baja es la 2100 m.s.n.m, mientras que la más alta se encuentra a la corona de la ladera siendo de 2145 m.s.n.m. Anexo I – Lámina 1
- La ladera posee un porcentaje de 45.21% de su superficie total con pendientes entre 40% al 70% que corresponde a terrenos fuertes. Anexo II – Lámina 2
- Del mapa de uso actual del suelo se pudo determinar cuatro categorías, de las cuales dos poseen mayor porcentaje como son: chaparros conformados por plantas bajas asociadas a pastos representan un 55.31% del área total, además se encuentran áreas secas desnudadas sujetas a erosión que representan un 25.46% del sector de estudio. Anexo II – Lamina 3
- La ladera Howard Johnson posee un movimiento traslacional con un factor de seguridad menor a 1.17 en todos los 7 perfiles por los 7 métodos de equilibrio límite analizando los parámetros geotécnicos en las condiciones: con nivel freático, sin nivel freático, considerándolo al talud como inestable.
- De los resultados obtenidos por los métodos de equilibrio límite presentan coherencia en todas las consideraciones adoptadas obteniendo resultados similares en cada modelo realizado, mostrando una reducción considerable en el factor de seguridad en la zona donde ya existe movimiento de masa, los modelos analizados con N.F. no constituyen sensibilidad en los análisis.
- Se concluye que dependiendo de la pendiente pronunciada, los suelos con pobres características geomecánicas, se dan en la capa superficial de la zona de estudio y la presencia de nivel freático, con lo que se corrobora el plano de falla de campo.
- De los valores obtenidos para el factor de seguridad en estado natural por los métodos de equilibrio límite con las condiciones: con nivel freático y sin nivel freático, se concluye que

los resultados de FS representan una mínima variación, por lo tanto el nivel freático no constituye sensibilidad en el análisis.

- En los resultados del cálculo del factor de seguridad se verifica con la bibliografía que los valores de FS son iguales o similar en los métodos de equilibrio límite que satisfaga el equilibrio de momentos. Tabla 9 y 11
- Al determinarlo al talud como inestable, se plantea la medida de mitigación reconfigurando la geometría del talud y diseñando estructuras de drenaje y subdrenaje para evacuar escorrentías y aguas subterráneas hacia sitios seguros, con la finalidad de disminuir la presión de poros e incrementar la resistencia al corte.
- El talud al estabilizarlo posee valores ≥ 1.5 como se indicó en el Perfil 2 considerado como el más crítico, el FS en estado natural es de 0.89 y el FS propuesto es de 1.53, su incremento del FS respecto el uno del otro es del 70%.
- Debido a las condiciones topográficas de la zona, los canales 5, 6 y 7 de recolección, conducción y evacuación de las escorrentías superficiales, tendrán forma rectangular y serán construidos de hormigón armado ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ + malla electrosoldada), estos canales incluirán elementos de rugosidad artificial (dados de hormigón y piedra bola) para disipar la energía del agua y reducir la velocidad, lo cual evitará problemas de erosión y desgaste (Anexo 5 – lámina 4).
- Las técnicas de bioingeniería planteadas incluyen el uso de especies vegetales propias de la zona, estas especies reducirán la infiltración de escorrentías y darán mayor resistencia a los esfuerzos cortantes del suelo, con lo cual se mitigarán el desplazamiento (Anexo 5 – lámina 7).

RECOMENDACIONES

- Modificar la geometría de la ladera, incluir obra hidráulicas y de revegetación, para lograr su estabilidad y garantizar seguridad a las propiedades adyacentes.
- Evitar la erosión presente en la zona y procurar revegetar con especies endémicas del sector, colocando las especies arbustivas y herbáceas en toda la ladera, para disminuir la infiltración y la escorrentía de la zona y mejorar la evapotranspiración a través de estos sembríos.
- Mantener el monitoreo GPSD ubicando hitos en la ladera, para realizar un seguimiento de desplazamientos, ya que al encontrarse esta ladera adyacente a viviendas se debe tener una gran sensibilidad.
- Recomendar al GAD del Municipio de Loja, para que incluya dentro de su programa de obras emergentes de alto riesgo, la reconfiguración de la geometría de la ladera y construcción de obras hidráulicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala, F., Andreu, F., Márquez, M., Ferrer, M., Fernández, I., Olalla, c. et al. (1986). Instituto geológico y minero de España. España.
- Castro, D. (2000). Tesis doctoral: estudio y análisis de las membranas flexibles como elemento de soporte para la estabilización de taludes y laderas de suelos y/o materiales sueltos. Universidad de Cantabria.
- Chow, Ven Te. (1994). Hidráulica de los Canales Abiertos. Santafé de Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Coello, C. (2012). Control de Aguas Superficiales y Subterráneas. Capítulo 13. Documento. Editorial Universidad de Cuenca.
- Duarte, A. (2009). Introducción a la hidráulica de canales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Segunda Edición, Bogotá.
- Duncan, S. (2005). Soil strength and slope stability. Engineering Geology, p. 297.
- González de Vallejo, I., Ferrer, M., Ortuño, I., Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Pearson Educación, Madrid.
- Guartán, J. (2010). Tesis máster, zonificación sísmica de la Cuenca de Loja (Ecuador), a partir de datos litológicos y medidas de ruido ambiental.
- Gutiérrez, C., Quaas, R., Ordaz, M., Guevara, E., Muría, D., & Krishna, S. (1996). Estabilidad de laderas. (S. Fasciculos, ed.), Cenapred (1996,2001). México.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D., Helg, U., and Hammer, C. (2001). Neogene Stratigraphy and Andean Geodynamics of Southern Ecuador, Earth Science Reviews, 57, p. 75-124
- INAMHI. (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Quito, Ecuador.
- INVIAS. (2009). Manual de drenaje para carreteras del Instituto Nacional de vías de la República de Colombia.
- INIGEMM. (2013). Mapa de geología regional 2017 escala 1:100.000
- Kennerley, J.B., (1973), Geología de la Provincia de Loja en el Sur del Ecuador.
- Mexichem. (2012). Manual y software de diseño con Geosintéticos Geosof Pavco. Novena Edición. Bogotá DC. Colombia. Editorial Norte Gráfico.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, (2014). Geotécnia y Cimentaciones.

- Rocscience. Slide. Guía rápida del usuario. (2010).
- Sanhueza,C., Rodriguez, I. (2012). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. Revista de la construccion, 12, pag. 17–29.
- Simón, T. E. W. (2011). Estudio del peligro de deslizamiento del norte de la ciudad de Loja, provincia de Loja. Ecuador, 1–84.
- Sotelo, G. (1974). Hidráulica general: Fundamentos. Editorial Limusa
- Suárez, J. (2003). Deslizamientos; Análisis Geotécnico. Colombia. Disponible en: www.erosion.com.co.
- Suárez, J. (2009). Deslizamientos: Técnicas de remediación - obras de drenaje y subdrenaje. capítulo 2. ISBN: 958-8504-04-9. Bucaramanga, Colombia. Editorial Universidad Industrial de Santander.
- Tamay, J. (2004). Mapa geológico preliminar de la hoya de Loja. Escuela de Geología y Minas. UCG-SIG/UPSI – UTPL. Loja – Ecuador.
- Therzaghi, K. (1950). Mechanisms of landslide. (B. C.A, Ed.) (Berkeley c).

ANEXOS