



**Investigación de laboratorio y elaboración de modelo conceptual de los mecanismos de falla
actuantes. Modelación matemática usando software.**

Pazos Galvez, Diana Carolina y Sopa Tipanquiza, Alexander Joel

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Bonifaz García, Hugo Fabián, Msc

10 de septiembre del 2021



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de integración curricular, **“Investigación de laboratorio y elaboración de modelo conceptual de los mecanismos de falla actuantes. Modelación matemática usando software”** fue realizado por los señores **Pazos Galvez, Diana Carolina y Sopa Tipanquiza, Alexander Joel**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 10 de septiembre del 2021

Firma

**HUGO
FABIAN
BONIFAZ
GARCIA**

Firmado
digitalmente por
HUGO FABIAN
BONIFAZ GARCIA
Fecha: 2021.09.09
10:34:17 -05'00'

Ing. Bonifaz García, Hugo Fabián

C.C: 0601786452



Document Information

Analyzed document	Pazos_Sopa.pdf (D112244218)
Submitted	9/8/2021 5:56:00 PM
Submitted by	
Submitter email	biblioteca@espe.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	ilbbioteca.GDC@analysis.orkund.com

Firma

HUGO
FABIAN
BONIFAZ
GARCIA

Firmado
digitalmente por
HUGO FABIAN
BONIFAZ GARCIA
Fecha: 2021.09.09
10:34:58 -05'00'

Ing. Bonifaz García, Hugo Fabián

C.C: 0601786452



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Pazos Galvez, Diana Carolina y Sopa Típanquiza, Alexander Joel**, con cédulas de ciudadanía N° **1750227983** y **1727214783**, respectivamente; declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular **"Investigación de laboratorio y elaboración de modelo conceptual de los mecanismos de falla actuantes. Modelación matemática usando software"**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de septiembre del 2021

Firma

Pazos Galvez, Diana Carolina
C.C: 1750227983

Firma

Sopa Típanquiza, Alexander Joel
C.C: 1727214783



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **Pazos Galvez, Diana Carolina y Sopa Típanquiza, Alexander Joel**, con cédulas de ciudadanía N° **1750227983** y **1727214783**, respectivamente, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular **“Investigación de laboratorio y elaboración de modelo conceptual de los mecanismos de falla actuantes. Modelación matemática usando software”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 10 de septiembre del 2021

Firma

Pazos Galvez, Diana Carolina
C.C: 1750227983

Firma

Sopa Típanquiza, Alexander Joel
C.C: 1727214783

Dedicatoria

El presente trabajo de integración curricular lo dedico principalmente a Dios, por ser inspirador y actuar como guía y fortaleza en el proceso de alcanzar este anhelo tan deseado. A mis padres John y Mónica que con su ejemplo, amor, apoyo incondicional y esfuerzo me han permitido culminar mi carrera profesional. A mis hermanas Pame y Gabi que han estado conmigo en todo momento brindándome cariño y palabras de aliento para alcanzar mis metas sin desfallecer. Y a mi sobrino Cristopher que con sus ocurrencias y sonrisas llena de alegría nuestra vida.

Diana Carolina Pazos Galvez

A Dios que me ha permitido llegar a este momento tan importante de mi vida, por brindarme sabiduría, fuerza y ser mi guía a lo largo de este camino y darme la oportunidad de vivir cientos de experiencias y aprendizajes en esta etapa. A mis padres Juan y Susana por ser el pilar fundamental de mi vida, mi mayor inspiración para salir adelante, por su enorme sacrificio y esfuerzo para brindarme las herramientas necesarias para lograr cada uno de mis objetivos. Por ser un ejemplo amor incondicional, persistencia, paciencia y convicción. Por confiar en mí y enseñarme que puedo lograr todo lo que me proponga. Los amo infinitamente. A mi hermana Dayana, que sepa que es capaz de lograr cualquier meta que se proponga. A mi pequeña hermana Valery por llenarme de risas y alegría. A mis abuelitos, tíos y primos por nunca dejar de velar por mi bienestar, por darme su cariño y apoyo en cada paso que doy. Por siempre depositar ese voto de confianza en mí. A todos mis seres queridos y amigos por siempre apoyarme y hacer de mi vida un sueño.

Alexander Joel Sopa Tipanquiza

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad de la Fuerzas Armadas - ESPE, a todas sus autoridades y a mis maestros, que con su sabiduría y profesionalismo me han compartido sus conocimientos a lo largo de este proceso de formación personal y académica. De manera especial agradezco a mi tutor Ing. Hugo Bonifaz y a todas las personas que nos compartieron sus conocimientos para que este trabajo se realice con éxito. Además, agradezco a mi compañero de investigación Alexander Sopa por su dedicación y tiempo entregado en el desarrollo del presente trabajo.

Diana Carolina Pazos Galvez

Quiero agradecer a Dios por ser mi guía en este camino, no solamente por brindarme sabiduría y fuerza para poder culminar la carrera, sino también por darme a todas aquellas personas que me han acompañado y formado parte de mi vida. A mi madre le agradezco todo su cariño, comprensión y paciencia, por siempre escucharme cuando la necesito. A mi padre por todo su esfuerzo y dedicación, por darse el tiempo para darme unas palabras de motivación en las largas noches. A mis amigos Dayanna, Diana, Kevin, Sani y Nicole quienes no solo me dieron su apoyo en la parte académica, sino que me brindaron su cariño y amistad en todos aquellos momentos entre risas y llantos. A todos aquellos compañeros que formaron parte de mi proceso en la universidad. A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, en especial a todos aquellos docentes y autoridades que se tomaron el tiempo y paciencia de compartir su sabiduría sin egoísmo velando por nuestro futuro. A mi tutor el Ing. Hugo Bonifaz y todas las personas que brindaron su conocimiento para culminar este trabajo. Y a mi compañera de proyecto Diana Pazos por todo su esfuerzo y dedicación para culminar este trabajo exitosamente.

Alexander Joel Sopa Tipanquiza

Índice de Contenido

Certificación	2
Urkund	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de Contenido	8
Índice de Tablas	14
Índice de Figuras	17
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I Generalidades	21
Planteamiento del Problema	21
Antecedentes	22
Ubicación General del Proyecto	23
Objetivos.....	23
Objetivo General	23
Objetivos Específicos.....	24
Justificación.....	24

Importancia.....	25
Capítulo II Fundamento Teórico.....	26
Talud.....	26
Partes de una Ladera o Talud.....	27
Deslizamiento.....	27
Partes de un Deslizamiento.....	28
Clasificación de los Deslizamientos.....	29
Mecanismos de Falla.....	35
Equilibrio o Desequilibrio de Fuerzas.....	35
Factores Condicionantes.....	36
Factores Desencadenantes.....	37
Análisis de Estabilidad de Taludes.....	39
Teoría del Equilibrio Límite.....	39
Factor de Seguridad.....	40
Superficie de Falla.....	40
Formas de la Superficie de Falla.....	41
Métodos de Análisis.....	42
Antecedentes Investigativos de Laboratorio.....	46
Contenido de Humedad de los Suelos.....	46
Peso Específico y Gravedad Específica.....	46

	10
Granulometría por Tamización	47
Límites de Consistencia	48
Clasificación de los Suelos	49
Permeabilidad de los Suelos	49
Compactación de los Suelos.....	51
Resistencia al Cortante de los Suelos.....	52
Capítulo III Metodología.....	55
Propiedades Índice de los Suelos	55
Ensayos Clasificación de los Suelos SUCS	55
Ensayo Peso Específico de los Suelos	55
Ensayo Permeabilidad de los Suelos	55
Ensayo Compacidad de los Suelos.....	55
Propiedades Mecánicas de los Suelos.....	55
Ensayos Resistencia al Corte de los Suelos.....	55
Modelo Conceptual de los Mecanismos de Falla	56
Recolección de Datos para el Desarrollo del Modelo.....	56
Caracterización y Descripción Escrita de los Elementos Fundamentales	56
Representación Gráfica de las Características de los Elementos Fundamentales	56
Modelo Matemático Usando Software	57
Análisis Regresivo de Factores de Seguridad	58

	11
Capítulo IV Resultados	59
Puntos Estratégicos para el Muestreo de Suelos	59
Descripción Manual Visual del Flanco Izquierdo	59
Descripción Manual Visual del Flanco Derecho.....	60
Caracterización de Suelos	60
Talud 1 UTM 729761.1 E 9746532.2 N.....	60
Talud 2 UTM 729996.1 E 9746649.8 N.....	62
Talud 3 UTM 729515.6 E 9746916.2 N.....	65
Tabulación de Resultados	67
Parámetros de Resistencia al Corte	68
Talud 1 UTM 729761.1 E 9746532.2 N.....	68
Talud 3 UTM 729515.6 E 9746916.2 N.....	69
Tabulación de Resultados	70
Permeabilidad Norma ASTM D 2434.....	70
Tabulación de Resultados	70
Compactación Norma ASTM D 1557 - 12	71
Tabulación de Resultados	71
Componentes del Deslizamiento que Resultan de Ensayos de Campo y Sondeos de Geofísica. 71	
Tipos de Movimiento	71
Superficie de Falla Bajo el Movimiento	72

Modelo Conceptual.....	73
Litología	73
Estructura Geológica	74
Geomorfología.....	75
Meteorización	77
Tectónica y Fracturación	78
Clima e Hidrología	80
Hidrogeología.....	81
Vegetación	83
Efecto Antrópico	83
Representación Gráfica del Modelo Conceptual.....	84
Modelación Matemática Usando Software.....	85
Perfil 1: Referente al Flanco Izquierdo	85
Perfil 2: Referente a las Piscinas de Oxidación	87
Perfil 3: Referente a Viviendas Vulnerables	89
Tabulación y Análisis de Resultados.....	91
Análisis Regresivo de Estabilidad de Taludes	93
Condiciones Iniciales	93
Condiciones Finales.....	97
Tabulación y Análisis de Resultados.....	100

Capítulo V Discusión.....	101
Conclusiones.....	103
Recomendaciones.....	105
Referencias.....	106
Anexos.....	114

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M1</i>	60
Tabla 2 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M1</i>	61
Tabla 3 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M2</i>	61
Tabla 4 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M2</i>	61
Tabla 5 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M3</i>	62
Tabla 6 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M3</i>	62
Tabla 7 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M4</i>	62
Tabla 8 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M4</i>	63
Tabla 9 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M5</i>	63
Tabla 10 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M5</i>	64
Tabla 11 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M6</i>	64
Tabla 12 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M6</i>	64
Tabla 13 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M7</i>	65
Tabla 14 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M7</i>	65
Tabla 15 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M8</i>	65
Tabla 16 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M8</i>	66
Tabla 17 <i>Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M9</i>	66
Tabla 18 <i>Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M9</i>	67
Tabla 19 <i>Resultados Obtenidos para Clasificación de los Suelos</i>	67
Tabla 20 <i>Resultados Corte Directo Muestra Alterada M1</i>	68
Tabla 21 <i>Resultados Corte Directo Muestra Alterada M2</i>	68
Tabla 22 <i>Resultados Corte Directo Muestra Alterada M3</i>	68
Tabla 23 <i>Resultados Corte Directo Muestra Alterada M7</i>	69

Tabla 24 <i>Resultados Corte Directo Muestra Alterada M8</i>	69
Tabla 25 <i>Resultados Triaxial UU Muestra Inalterada MT3</i>	69
Tabla 26 <i>Resultados Obtenidos para Parámetros de Resistencia al Corte</i>	70
Tabla 27 <i>Resultados Obtenidos para Permeabilidad de los Suelos</i>	70
Tabla 28 <i>Resultados Obtenidos para Densidad Seca Máxima y Humedad Óptima de los Suelos</i>	71
Tabla 29 <i>Dirección y Ubicación de Grietas</i>	78
Tabla 30 <i>Ubicación de Afloramientos de Agua</i>	81
Tabla 31 <i>Parámetros del Suelo Perfil 1, Perfil 2 y Perfil 3</i>	85
Tabla 32 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 1 Método de Janbú</i>	86
Tabla 33 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 1 Método de Spencer</i>	86
Tabla 34 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 1 Método de Morgenstern - Price</i>	87
Tabla 35 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 2 Método de Janbú</i>	88
Tabla 36 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 2 Método de Spencer</i>	88
Tabla 37 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 2 Método de Morgenstern - Price</i>	89
Tabla 38 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 3 Método de Janbú</i>	90
Tabla 39 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 3 Método de Spencer</i>	90
Tabla 40 <i>Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 3 Método de Morgenstern - Price</i>	91
Tabla 41 <i>Factores de Seguridad FS Obtenidos en el Análisis de Estabilidad</i>	91
Tabla 42 <i>Parámetros del Suelo - Condiciones Iniciales</i>	93
Tabla 43 <i>Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Janbú</i>	94
Tabla 44 <i>Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Spencer</i>	95
Tabla 45 <i>Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Morgenstern – Price</i>	96
Tabla 46 <i>Parámetros del Suelo Resultantes del Análisis Regresivo de FS</i>	97
Tabla 47 <i>Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Janbú</i>	97

Tabla 48 <i>Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Spencer</i>	98
Tabla 49 <i>Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Mongenstern – Price</i>	99
Tabla 50 <i>Factores de Seguridad FS Obtenidos en el Análisis Original y en el Regresivo</i>	100

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Mapa de Ubicación del Proyecto</i>	23
Figura 2 <i>Talud Natural y Artificial – Nomenclatura</i>	26
Figura 3 <i>Partes de un Deslizamiento</i>	29
Figura 4 <i>Esquema de Proceso de “Creep”</i>	30
Figura 5 <i>Deslizamiento Rotacional</i>	32
Figura 6 <i>Esquema Deslizamiento Rotacional / Deslizamiento Traslacional</i>	33
Figura 7 <i>Deslizamiento Tipo Flujo de Materiales Granulares</i>	34
Figura 8 <i>Mecanismos de Falla</i>	35
Figura 9 <i>Esquema - Superficie de Falla</i>	41
Figura 10 <i>Formas de la Superficie de Falla</i>	42
Figura 11 <i>Dovela de Janbú</i>	43
Figura 12 <i>Fuerzas del Método de Spencer</i>	44
Figura 13 <i>Círculos de Falla Mohr - Coulomb</i>	53
Figura 14 <i>Caja de Corte Directo</i>	54
Figura 15 <i>Vista Frontal del Deslizamiento de Chunchi</i>	59
Figura 16 <i>Estratos Geológicos de la Zona del Deslizamiento</i>	75
Figura 17 <i>Ubicación de los Escarpes en el Deslizamiento</i>	76
Figura 18 <i>Grietas Cercanas a las Piscinas de Oxidación</i>	79
Figura 19 <i>Fisuras en Propiedad Sr. Idrovo</i>	79
Figura 20 <i>Microcuencas del Cantón Chunchi</i>	81
Figura 21 <i>Vegetación Característica de la Zona</i>	83
Figura 22 <i>Modelo Conceptual Adoptado</i>	84
Figura 23 <i>Ubicación de Análisis - Perfil 1</i>	85

Figura 24 <i>Ubicación de Análisis - Perfil 2</i>	87
Figura 25 <i>Ubicación de Análisis - Perfil 3</i>	89
Figura 26 <i>Ubicación del Análisis en Regresión de FS</i>	93

Resumen

En el presente trabajo se da a conocer la investigación y evaluación del deslizamiento ocurrido en febrero de 2021 en el Cantón Chunchi, Provincia de Chimborazo, Ecuador.

El objetivo fue elaborar un modelo conceptual que explique los mecanismos de falla actuantes y el movimiento, se complementó con un modelamiento matemático de análisis de estabilidad de taludes en zonas susceptibles y un análisis regresivo de factores de seguridad de la superficie deslizada que determinen los parámetros reales que proporcionan estabilidad a la zona.

La metodología que se aplicó fue cuantitativa y experimental basada en investigación de laboratorio y descripción de factores condicionantes y desencadenantes en la ocurrencia de deslizamientos. Para el análisis de los sitios susceptibles a deslizamientos se empleó métodos de equilibrio límite (Janbú, Spencer y Morgenstern & Price) para determinar factores de seguridad.

Además, se estableció un análisis regresivo de estabilidad con iteración de los valores de parámetros de resistencia al corte hasta obtener un resultado de estabilidad en el terreno.

De acuerdo con el análisis realizado se concluye que los factores más determinantes para la ocurrencia del siniestro fue el agua, su manejo y las condiciones topográficas. Los resultados del análisis de estabilidad muestran que bajo condiciones estáticas el flanco izquierdo es inestable.

Y bajo condiciones pseudo estáticas en todos los análisis resultaron valores menores a 1. Por último, se determinó los parámetros de resistencia al corte necesarios para establecer condiciones de estabilidad en la zona deslizada.

Palabras clave:

- **DESLIZAMIENTO**
- **MODELO CONCEPTUAL**
- **FACTOR DE SEGURIDAD**
- **ESTABILIDAD DE TALUDES**

Abstract

This work reports the investigation and evaluation of the landslide that occurred in February 2021 in Chunchi Canton, Province of Chimborazo, Ecuador.

The objective was to elaborate a conceptual model that explains the acting failure mechanisms and the movement, complemented with a mathematical modeling of slope stability analysis in susceptible areas and a regression analysis of safety factors of the slipped surface to determine the real parameters that provide stability to the area.

The methodology applied was quantitative and experimental based on laboratory research and description of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides. For the analysis of sites susceptible to landslides, limit equilibrium methods (Janbu, Spencer and Morgenstern & Price) were used to determine safety factors. In addition, a regressive stability analysis was established with iteration of the shear strength parameter values until a ground stability result was obtained.

According to the analysis carried out, it was concluded that the most determining factors for the occurrence of the incident were water, water management and topographic conditions. The results of the stability analysis show that under static conditions the left flank is unstable.

Finally, the shear strength parameters necessary to establish stability conditions in the landslide zone were determined.

Key words:

- **SLIPPAGE**
- **CONCEPTUAL MODEL**
- **FACTOR OF SAFETY**
- **SLOPE STABILITY**

Capítulo I

Generalidades

Planteamiento del Problema

Desde inicios del siglo XIX, en el territorio ecuatoriano han ocurrido diversos fenómenos naturales, que han producido pérdidas humanas, materiales y económicas con consecuencias representativas en la vida de los habitantes cuyos lugares fueron afectados por estos siniestros.

El Ecuador debido a diversas características tiene como una de las amenazas primordiales a los deslizamientos, estos fenómenos representan un riesgo constitutivo para diversas zonas específicas del territorio nacional.

Los riesgos geológicos deben tenerse en cuenta para la planificación de un territorio. Pues se evidencia que el análisis previo de este tipo de siniestros naturales no se lo realiza con la misma veracidad que otros procesos, una de las causas puede ser que el número de pérdidas humanas que se producen en su ocurrencia es bajo, a pesar de esto las pérdidas materiales son de mayor magnitud.

El sector La Armenia, en la provincia de Chimborazo recientemente fue afectado por un movimiento de masa que ha ocasionado daños económicos, materiales, e incluso la pérdida de vida humana. Así como este fenómeno se han suscitado muchos otros que constituyen un gran peligro en la seguridad de sus pobladores.

La inestabilidad del terreno estaba condicionada principalmente por las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidrogeológicas del sector, que se combina con el crecimiento urbano no planificado, uso del suelo y clima del sitio. Estos factores influyen en la generación de deslizamientos. El problema radica en las consecuencias de este tipo de fenómenos en los cuales se puede destacar el incremento de sedimentos en los cuerpos

hídricos, bloqueo de vías, arrastre de lodo, e incluso han llegado a afectar el abastecimiento de agua potable de la ciudad en cuestión.

Por lo tanto, conceptualizar las diferentes causas por las cuales se pudo haber desarrollado este siniestro y entender cómo se produjo el fenómeno mediante un estudio de laboratorio para poder plantear establecer un modelo que muestre las características del suceso es vital para prever otras problemáticas con el mismo resultado.

Antecedentes

La provincia de Chimborazo constituye una de las provincias de la sierra ecuatoriana más susceptible a procesos de movimientos en masa que afectan la seguridad y la vida de las personas.

Parámetros como las condiciones geológicas, hidrometeorológicas, el manejo de aguas servidas y de aguas lluvia, el uso del suelo, la deforestación y la sismicidad de la zona son factores condicionantes y detonantes responsables de la ocurrencia de dichos procesos que generan preocupación en los habitantes de las zonas afectadas y en las autoridades responsables que los representan.

La investigación está direccionada a la evaluación de esta clase de siniestros dentro del cantón Chunchi, ubicado en el límite sur de la provincia de Chimborazo, integrado por parroquias rurales y que cuenta con una población total de 20.587 habitantes. La economía de este lugar se basa principalmente en la ganadería y la agricultura.

Históricamente, los sectores que conforman el cantón Chunchi han presenciado eventos de deslave y deslizamiento de lodo registrados en los años 1982, 1983, 1998, 2017 y el más reciente deslizamiento ocurrido en el año 2021 al oeste del cantón, motivo por el cual se aborda la presente investigación y evaluación. Las consecuencias de la ocurrencia de estos eventos son muy graves, puesto que trae consigo pérdidas humanas y materiales patrimoniales.

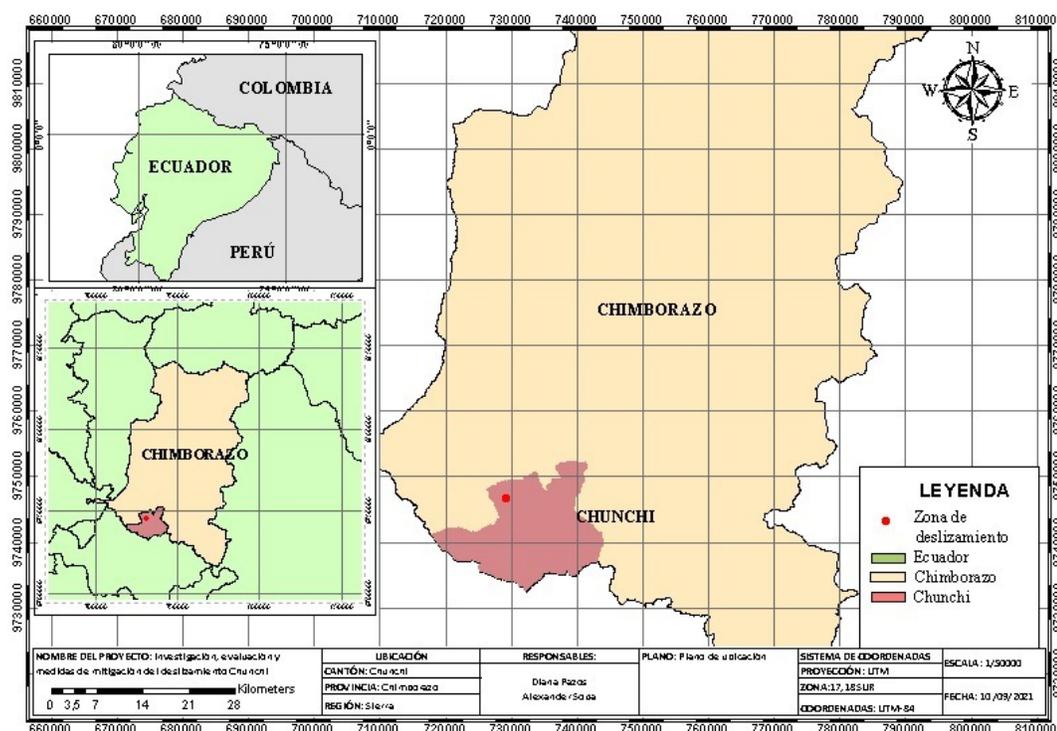
Estos desastres han puesto en evidencia la corta recurrencia de las amenazas que, acompañadas de la poca preparación de la población y el lento accionar de las autoridades competentes, dan como resultado una enorme vulnerabilidad en la región.

Ubicación General del Proyecto

El presente estudio se desarrolla en los sectores afectados La Armenia y La Primavera, que conforman la cabecera cantonal del cantón Chunchi, provincia de Chimborazo, perteneciente al territorio ecuatoriano.

Figura 1

Mapa de Ubicación del Proyecto



Objetivos

Objetivo General

Elaborar un modelo conceptual mediante investigación de laboratorio y descripción de elementos que expliquen los mecanismos de falla actuantes y el movimiento del deslizamiento,

complementado con un modelamiento matemático de análisis de estabilidad de taludes en zonas susceptibles y un análisis regresivo de factores de seguridad de la superficie deslizada que determinen los parámetros reales que proporcionan estabilidad a la zona afectada.

Objetivos Específicos

- Determinar características índices de los suelos a partir de las muestras recuperadas de campo.
- Determinar los parámetros de resistencia al corte de los suelos de estudio mediante los ensayos correspondientes en laboratorio.
- Describir y analizar los elementos y factores fundamentales que determinan el comportamiento de un talud para la evaluación de los mecanismos de falla actuantes.
- Realizar un análisis de estabilidad de taludes, en condiciones estáticas y pseudo estáticas, mediante el método de equilibrio límite en zonas susceptibles a deslizamiento.
- Realizar un análisis regresivo de factores de seguridad para delimitar los parámetros de resistencia al corte que proporcionen estabilidad a la zona deslizada.

Justificación

Este trabajo se realiza con la finalidad de abordar las posibles causas del deslizamiento en el sector La Armenia, empleando ensayos de laboratorio y desarrollando un modelo que permita entender la forma en que se desarrolló este evento tomando en cuenta los factores previos al siniestro.

Desde el punto de vista de la ocupación y de ordenamiento territorial, el análisis a este tipo de fenómenos proporcionaría información relevante para futuros accidentes, contribuyendo a disminuir la cantidad de bienes materiales y vidas humanas perdidas en este tipo de eventos.

Importancia

Este trabajo de Integración Curricular pretende explicar el mecanismo de movimientos en masa de grandes volúmenes de suelo y roca proponiendo un modelo conceptual y posteriormente matemático, en software de simulación, que permita generalizar el proceso de evaluación de estabilidad de pendientes en el cantón Chunchi y que pueda aplicarse a otros sitios inestables en la misma región.

La investigación de laboratorio también entregará productos acreditables, caracterización de suelos y parámetros de resistencia al corte, con el fin de que sean factores conocidos y debidamente considerados por las autoridades competentes al momento de implantar cualquier plan de manejo e instaurar obras de remediación en la zona afectada.

Los resultados que se entregan apoyarán y servirán para agilizar la ejecución de posteriores proyectos que se quieran establecer dentro de la zona de estudio, al mismo tiempo que evitará pérdidas humanas, económicas y de infraestructura.

Capítulo II

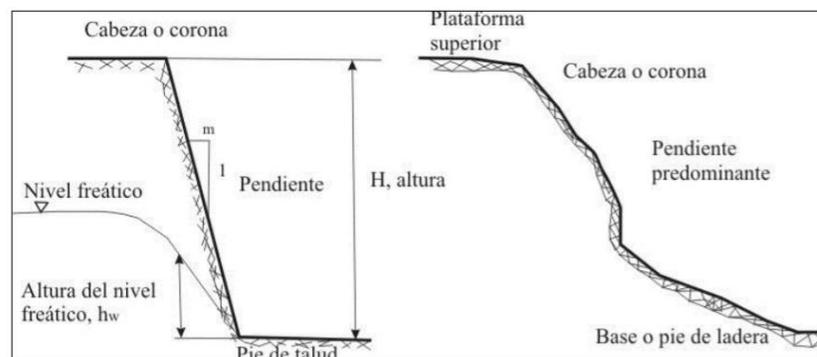
Fundamento Teórico

Talud

Se denomina de talud a la superficie inclinada en relación con la horizontal, se trata de una masa de tierra que es desigual, pero cuya pendiente o elevación varía significativamente. Su forma generalmente es cóncava hacia arriba, y sus máximas inclinaciones dependen del ángulo de reposo del material que lo componen. Pueden ser naturales o artificiales cuando tiene algún tipo de intervención humana (Altamirano & Rivas, 2015).

Figura 2

Talud Natural y Artificial – Nomenclatura



Nota. Tomado de (Sánchez, 2017).

Generalmente los taludes se encuentran en condiciones de estabilidad durante muchos años hasta que sufren alteraciones por diversos factores como pueden ser cambios topográficos y sísmicos, variación en la resistencia del suelo, presencia de flujos de agua subterránea, condiciones meteorológicas o por algún tipo de intervención humana que modifique la estabilidad de la masa de terreno provocando alteraciones que conlleven a un posible deslizamiento (Puca, 2015).

Partes de una Ladera o Talud

Se tienen términos generales para describir un talud. Generalmente sus pendientes se tratan de picos convexos, crestas o acantilados donde se produce algún proceso de erosión. El centro del cuerpo se puede considerar semi recto y la parte inferior es de forma cóncava (Chimone, 2018). Seguidamente se mencionan las partes más significativas de un talud:

Pie o base: Se identifica en la parte baja del talud. En esta se aprecia un cambio súbito de la pendiente, que generalmente es de forma cóncava.

Cabeza, cresta o cima: Se identifica en la parte superior del talud donde se aprecia un cambio pronunciado de pendiente. Se denomina escarpe cuando la inclinación de la pendiente es muy pronunciada, casi vertical, y pueden coincidir con la corona de los deslizamientos.

Altura: Esta característica en un talud artificial es fácilmente definible como la diferencia de cota entre la cabeza de la ladera y el pie de esta.

Nivel freático: Se considera como la parte superior de la capa de agua o de un acuífero, precisamente donde la presión por agua iguala la atmosférica (Suárez, 2009).

Pendiente: Se trata de la medida de inclinación de la ladera con respecto a la línea horizontal. Representada de varias maneras, como un ángulo, en porcentaje o relación de distancia horizontal por unidad de distancia vertical.

Cuanto mayor es resistencia del suelo o macizo rocoso mayor suele ser inclinación en la pendiente de un talud. Además, diversos factores topográficos afectan el comportamiento de una pendiente, tales como: la longitud, la curvatura, la convexidad y el área de la cuenca que condiciona el manejo del drenaje (Montero, 2017).

Deslizamiento

Cuando un talud pierde la condición de equilibrio y pierde su estado normal puede desencadenar en un deslizamiento. Para (Bajracharya, 2006) un deslizamiento se trata del

movimiento del suelo hacia abajo de una ladera o pendiente. El deslizamiento de tierra contempla tanto los procesos de erosión suelo como los de denudaciones, desprendimiento de la capa más externa de una masa de terreno.

Los factores y propiedades exactas por las que se produce este fenómeno no se incluyen en la definición, debido a su complejidad. A pesar de esto se puede inducir al fenómeno como producto de acciones como la gravedad, geológicas, hidráulicas, sísmicas, topográficas, etc (Mora, 1992).

Este fenómeno se desarrolla en su mayoría en el plano de la superficie de falla, dependiendo del tipo puede ser movimiento en caída libre, en masa, de tipo flujo o desencadenado por erosión. Los movimientos en el talud pueden dividirse unas partes hacia arriba mientras otras con dirección opuesta. Las condiciones que determinan la estabilidad están definidas por elementos con la capacidad de alterar tanto las fuerzas externas como las internas que intervienen sobre la masa de tierra (Highland, 2004).

Partes de un Deslizamiento

Cabeza: Representa el material desplazado que se ubica en la parte superior, no siempre corresponde a la cabeza de la ladera. Arriba de esta se encuentra la corona.

Cima: Se trata del punto de contacto entre el escarpe principal y el material desplazado. Representa la parte más alta de la cabeza.

Corona: En la corona se encuentra el material que no ha sido desplazado, generalmente material sin modificar que se encuentra hacia lo alto de la cabeza, arriba del escarpe.

Escarpe: Se trata del área de terreno de gran inclinación a lo largo del contorno extremo superior de la superficie en alteración, provocada por el movimiento del suelo.

Superficie de falla: Área que limita la masa de suelo que se desplaza con la que no sufre movimiento alguno. Se encuentra debajo del movimiento.

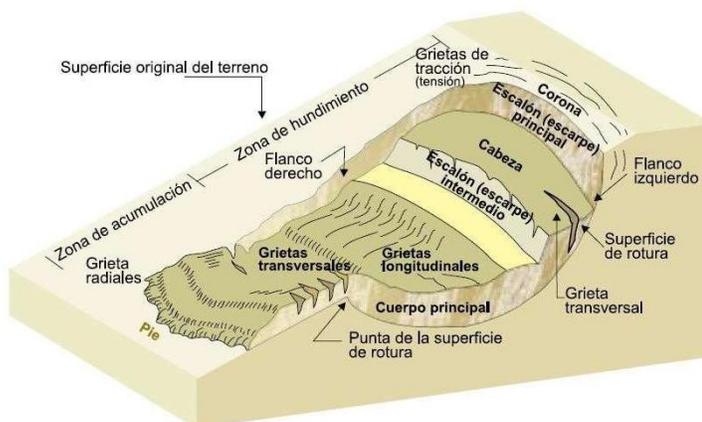
Base: Superficie tapada por la masa de material desplazado producto del deslizamiento que se encuentra bajo el pie de la superficie de falla.

Cuerpo del deslizamiento: Se conforma por masa de suelo que ha sido afectado por el movimiento por arriba de la superficie de falla. Cuando se trata de un evento de gran magnitud pueden haber más de uno.

Costado o flanco: Se denomina flanco al contorno lateral del movimiento de suelo. Los flancos derecho e izquierdo deben estar bien diferenciados entre sí.

Figura 3

Partes de un Deslizamiento



Nota. Tomado de (Camacho, 2021).

Clasificación de los Deslizamientos

Existen varias clasificaciones de los deslizamientos, todas basadas en las características de los materiales en cuestión y los mecanismos de falla o rotura. Varios autores han utilizado diferentes factores discriminantes para diferenciar y establecer una clasificación de este tipo de movimientos. Factores como material, tipo de movimiento, velocidad, morfometría, etc.

Para este caso se tomarán los principales tipos de deslizamiento de los sistemas propuestos por (Varnes, 1978) y (Alcántara, 2000) . La tipología se basa en movimientos de masa

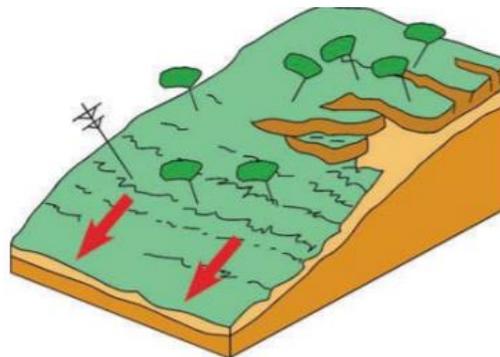
hacia abajo de una pendiente. Los tipos más comunes y determinantes para este estudio son los deslizamientos superficiales (creep), los movimientos en masa y los flujos.

Reptación “Creep” o Deslizamientos Superficiales. Se trata de un movimiento de la masa de terreno superficial, pueden ser muy lentos a extremadamente lentos donde no se puede definir el plano de falla. Este puede variar desde poca altura como centímetros hasta grandes profundidades. El creep involucra una gran extensión de terreno donde el desplazamiento en la superficie de este se manifiesta sin un cambio brusco entre las partes del suelo que se mueve con la que masa inmóvil. (De Matteis, 2003).

Existen dos tipos creep, el estacional y el masivo. El primero se limita a las capas superficiales del terreno, que son afectadas por los cambios meteorológicos estacionales. El creep masivo en cambio afecta a las capas de suelo de mayor profundidad, producido por efecto gravitacional (Montero, 2017).

Figura 4

Esquema de Proceso de “Creep”



Nota. Tomado de (Copons & Tallada, 2009).

Soliflucción es un tipo de “creep” que ocurre especialmente en las partes altas de una cordillera, en áreas próximas a los nevados donde la temperatura alcanza puntos de congelación. Cuando aumenta la temperatura y se descongela el agua de los poros en las capas de suelo más superficiales se produce una reptación del terreno en cuestión (Suárez, 2009).

Deslizamientos en Masa. Se trata de un movimiento brusco que puede afectar a grandes masas de suelo donde ocurre un proceso de cizallamiento a lo largo de una o más superficies de falla. Esta superficie de falla se forma durante el desarrollo del fenómeno donde los esfuerzos cortantes a los que está sometido el terreno son mayores a la fuerza resistente al corte de los suelos. La masa perturbada puede constar de un solo bloque de movimiento combinado o de varios bloques o volúmenes semi independientes (De Matteis, 2003).

El movimiento no siempre es brusco en ocasiones puede ser progresivo, lo que quiere decir que el fenómeno no se desencadena en toda la longitud del plano de falla al mismo tiempo, sino más bien se desarrolla de forma gradual (Chacón, 2012).

Se tiene dos tipos bien diferenciados, los deslizamientos rotacionales y los traslacionales.

Deslizamiento Rotacional. Se define un movimiento con una superficie de falla de forma curva, por la cual se produce el deslizamiento. Su superficie es de forma cóncava en dirección hacia arriba donde el movimiento se da rotacionalmente a razón del eje paralelo a la base y perpendicular al deslizamiento. El centro de revolución de la masa desplazada se ubica arriba de centro de gravedad del cuerpo del deslizamiento. (Suárez, 2009).

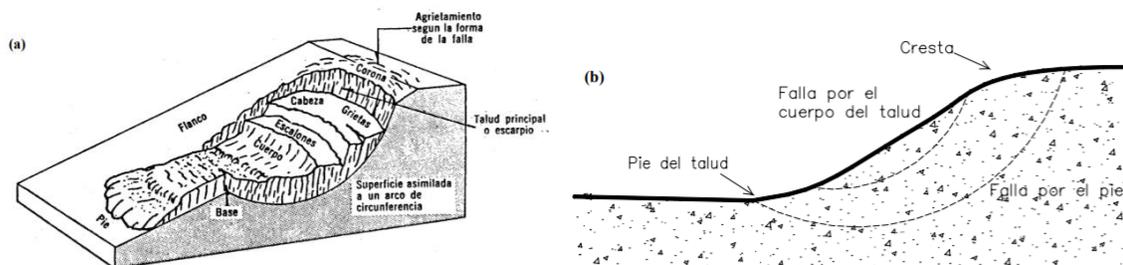
Generalmente se da en terrenos constituidos por materiales homogéneos, o capas gruesas de arcilla. Aunque de igual forma puede presentarse en taludes con suelos gruesos de tipo granular o en estratos de roca meteorizada, en donde la presión de poros alcanza valores considerables como para generar una falla rotacional en lugar de una falla de tipo traslacional (Montero, 2017).

Curvatura de la superficie de falla. Para suelos homogéneos, en zonas tropicales en el momento que se presenta este fenómeno superficie de falla se presenta como curva, aunque no

estrictamente circular (Suárez, 2009). Por lo general en estos deslizamientos se crea una superficie cóncava que se asemeja a una cuchara (Montero, 2017).

Figura 5

Deslizamiento Rotacional



Nota. (a) Región de Falla (b) Ubicación. Tomado de (De Matteis, 2003).

Deslizamiento Tipo Traslación. Según (Montero, 2017), en este tipo de deslizamiento se desarrolla una falla por cortante sobre una superficie básicamente plana a lo largo de la pendiente del talud, por lo que el material en movimiento sigue una dirección casi paralela a la pendiente del terreno. La relación D/L por lo general es de 0,1 o menos.

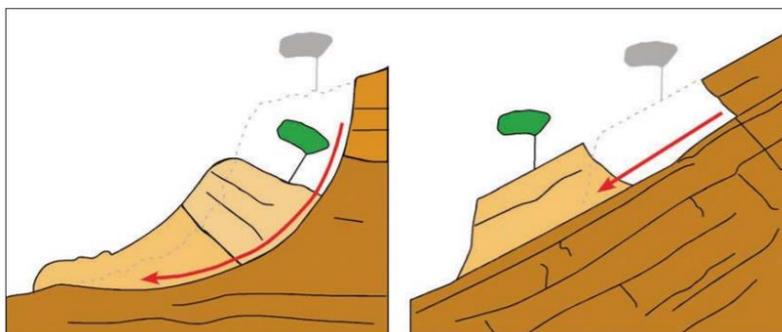
La superficie de falla ocurre en las zonas de cambio de estratos y se forma paralela al estrato débil. Los cuales por lo general se tratan de arcillas blandas o de suelos constituidos por arenas o limos sin plasticidad. Estos estratos comúnmente presentan una presión de poros elevada debido a las temporadas de escorrentía considerable en el sector (De Matteis, 2003).

Deslizamientos traslacionales en suelos residuales: En este tipo de suelo las disconformidades en la meteorización de sus materiales en cada estrato pueden desencadenar movimientos de traslación. Los planos de falla en su mayoría se presentan en las zonas donde la resistencia al esfuerzo cortante cambia por procesos de meteorización de suelo (Suárez, 2009).

Los deslizamientos de traslación en suelos residuales generalmente son rápidos y pueden terminar en flujos, especialmente en las zonas de pendiente fuerte (Suárez, 2009).

Figura 6

Esquema Deslizamiento Rotacional / Deslizamiento Traslacional



Nota. Tomado de (Copons & Tallada, 2009).

Flujos. Se denominan flujos a un tipo de falla de movimientos de mayor velocidad que se desarrollan en un talud con la característica que el movimiento se comporta de una forma similar a un líquido viscoso (Bajracharya, 2006).

Se entiende como una respuesta plástica o semi viscosa de las masas de suelo o macizo rocosos debido a desplazamientos relativos entre las partículas de suelo desencadenado por la inexistencia de esfuerzos. Por lo general afecta a suelos superficiales relacionados con cambios en la presión de poros (Chacón, 2012).

Su plano de deslizamiento no se lo puede identificar o su periodo de reconocimiento es muy corto en el lapso del inicio del fenómeno. La zona que separa la masa desplazada con el material que se mantiene sin perturbación alguna suele ser por lo general una zona de flujo plástico. Los materiales no consolidados son los más susceptibles a fluir, como los de partícula granular fina, arcillas, depósitos de talud y hasta fragmentos de roca pueden formar un flujo de lodo (De Matteis, 2003).

Activación de Flujos. Para (Suárez, 2009) la ocurrencia de flujos puede ser desencadenada por diversos factores entre los que se destacan:

Lluvias: La saturación del material subterráneo de un terreno puede convertir el suelo en un fluido viscosos. Suelos de materiales volcánicos absorben agua con mucha facilidad cuando se producen perturbaciones tempranas de deslizamientos o grietas y esto puede conducir a la formación de flujos.

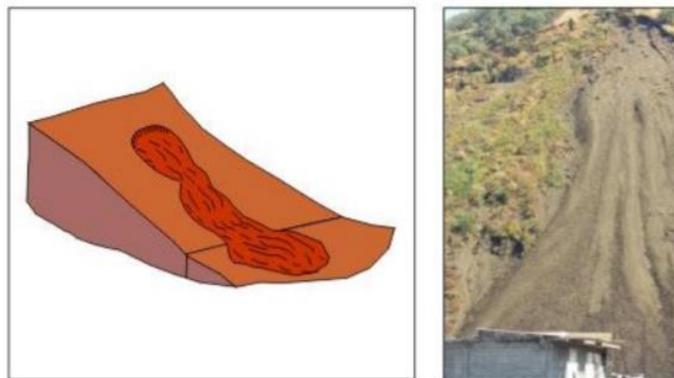
Deshielo: En zonas de nevados el deshielo puede ser el factor predominante para la ocurrencia de flujos de materiales de origen volcánico, mejor conocidos como “Lahares”.

Sismos: Eventos sísmicos pueden producir desmoronamiento de bloques de suelo o roca generando ocasionalmente flujos. De igual forma estos fenómenos naturales producen licuación de suelos que podrían desencadenar en flujos de suelo o lodo.

Deslizamiento de alta pendiente: Frente a un deslizamiento rotacional o de traslación en una zona con una inclinación pronunciada, puede haber la probabilidad de activación de un flujo debido a que el material deslizado adquiere velocidad por efecto de la gravedad. Además, la ocurrencia de varios movimientos de masa puede desatar un flujo de grandes magnitudes.

Figura 7

Deslizamiento Tipo Flujo de Materiales Granulares



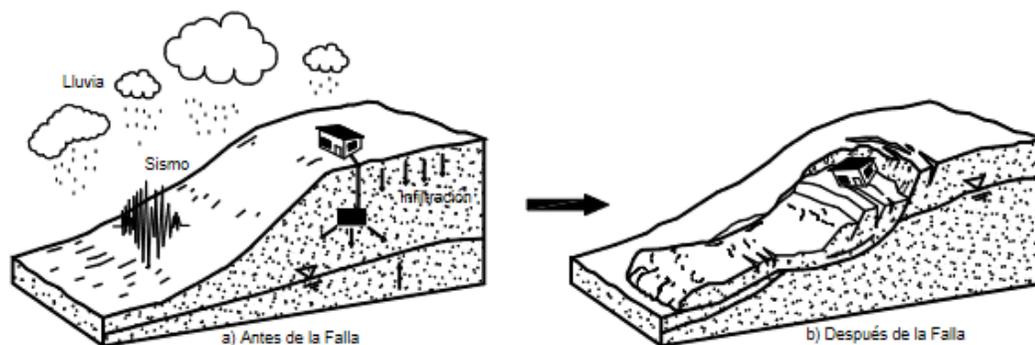
Nota. Tomado de (Sánchez, 2017).

Mecanismos de Falla

La explicación técnica de las acciones y agentes que transforman un talud estable en inestable se refiere a los mecanismos de falla que lo componen. Es indispensable conocer detalladamente este proceso dinámico evolutivo que ocurre dentro del talud, las causas que lo originan y el grado de amenaza que posee para poder realizar un diagnóstico completo del comportamiento o mecanismo de falla (Suárez, 2009).

Figura 8

Mecanismos de Falla



Nota. Varios factores inciden en la inestabilidad de taludes, estos son explicados técnicamente mediante los mecanismos de falla. Tomado de (Suárez, 2009).

Equilibrio o Desequilibrio de Fuerzas

Un talud es estable cuando existe equilibrio entre sus fuerzas actuantes y sus fuerzas resistentes. El objetivo fundamental del análisis de estabilidad, este es conocer la seguridad de un talud a partir de la determinación de un coeficiente (Melentijevic, 2005).

Se puede generar inestabilidad en taludes aumentando su pendiente, colocando cargas adicionales en la corona o desestabilizando su pie.

Factores Condicionantes

A estos factores se los denomina también como pasivos y corresponden directamente a los materiales naturales. El grupo se conforma por factores fundamentales que a continuación se describen:

Estratigrafía y Litología. La susceptibilidad que tienen las laderas frente a la ocurrencia de deslizamientos está íntimamente relacionada con la naturaleza del material que forma un talud. Esto incluye las propiedades físicas y resistentes que definirán la respuesta tensodeformacional de cada tipo de material ante la ocurrencia de un deslizamiento. En el análisis de taludes heterogéneos se debe tomar en cuenta el comportamiento característico de cada material, y a su vez considerar el compartimento en conjunto de los diversos materiales que conforman el talud (González De Vallejo, 2002).

Estructura Geológica. La estructura geológica se caracteriza por presentar las discontinuidades, fracturas y superficies de debilidad del talud. Los problemas de estabilidad vienen condicionados por parámetros geométricos como la altura, inclinación y orientación que esté presente (Suárez, 2009).

La presencia de discontinuidades que se ven reflejados en los planos preferenciales de rotura, actúan como factor determinante de la dirección del movimiento; la relación que existe entre las dimensiones del frente del talud y la red de discontinuidades será el indicador del tipo y volumen de inestabilidad que se presenta en la zona de análisis (González De Vallejo, 2002).

Condiciones Hidrogeológicas. El efecto que tiene el agua sobre el terreno es importante y se tiene que considerar en el análisis.

Factores como la posición del nivel freático, características de los caudales, infiltración permeabilidad y porosidad, influyen directamente en la incorporación de agua en los suelos que actúa como elemento condicionante en eventos de remoción en masa (Lara, 2007).

Propiedades Geomecánicas de los Suelos. La cohesión y el rozamiento interno de los suelos son los parámetros que definen la resistencia de los materiales que conforman un talud, estos vienen influenciados por la historia geológica de la que son parte y son capaces de predecir un comportamiento y futuro estado, pues la base de los procesos que van a ocurrir son los procesos actuales y pasados. Además de la litología, las discontinuidades también juegan un papel importante en la identificación del comportamiento de un material, estos planos de debilidad son aspectos esenciales que hay que considerar y se requiere la identificación de su origen, espaciado, rugosidad y posible presencia de agua que genere meteorización de las paredes (González De Vallejo, 2002).

Pendiente y Topografía. Los factores de seguridad al deslizamiento disminuyen mientras más aumenta la pendiente en un talud, pues se incrementan las fuerzas desestabilizadoras que terminarán con el equilibrio que existe entre las fuerzas que actúan y las que resisten en el talud. Inclinaciones y flujos de residuos se presentan con mayor frecuencia en taludes de alta pendiente (Suárez, 2009).

Factores Desencadenantes

Son los factores encargados de producir la rotura luego de haberse cumplido ciertas condiciones de deterioro. Se caracterizan por ser factores externos que modifican las propiedades del talud hasta disolver el estado de equilibrio en el que se encuentre (GeoQuantics, 2019).

Sobrecargas Estáticas. El incremento en las fuerzas que actúan sobre la masa de suelo se puede producir al aplicar cargas estáticas sobre la corona del talud generando inestabilidad. Este tipo de cargas incluye peso de rellenos, estructuras, escombreras o el paso de vehículos, que al no ser consideradas y controladas en las evaluaciones de estabilidad, llevan al talud a condiciones de falla (Seguridad Minera, 2018).

Cargas Dinámicas. El apartado se refiere a los movimientos sísmicos o vibraciones producidas en el entorno cercano del talud, al aplicarse cargas dinámicas sobre el suelo se provocan apertura de discontinuidades preexistentes, esto lleva a que la resistencia al corte disminuya hasta una posible rotura general del talud. Estas fuerzas deben incluirse si el talud en análisis se encuentra en ubicaciones con riesgo sísmico o sometido a cualquier otro tipo de fuerza dinámica, en el proceso de análisis se debe tomar en cuenta el efecto dinámico como una acción pseudo - estática que esté en relación de la aceleración máxima horizontal que produzca el sismo (González De Vallejo, 2002).

Régimen Climático. Este factor que incluye periodos de sequía y lluvia influye directamente en el contenido de agua en un talud. Al modificarse estos parámetros se generan alteraciones en la estructura de los suelos que dan lugar a pérdidas de resistencia de los materiales en función de la cantidad de agua sobre la superficie del terreno (González De Vallejo, 2002).

Existen varios aspectos a considerar con respecto a la pluviosidad, tres de ellos son los que más inciden con respecto a la estabilidad de taludes, es importante comparar la alta y baja precipitación anual, la acumulación de la pluviosidad en un año determinado y la intensidad de la lluvia, con el objetivo de conocer el incremento de la saturación del terreno motivo por el cual se elevarían los niveles freáticos (Grases et al., 1997).

Reducción de las Propiedades Resistentes. Se refiere a la perturbación y degradación de los materiales al verse expuestos a condiciones ambientales, cuando los materiales pierden su resistencia, puede generarse caída superficial o roturas generales en el talud, especialmente cuando hay presencia de agua. La reducción de las propiedades resistentes se genera por procesos de meteorización, por la acción de la erosión o también por actividades humanas (Suárez, 2009).

Análisis de Estabilidad de Taludes

El nivel de precisión en el análisis de estabilidad depende de la exactitud con la cual se definan los esfuerzos característicos del suelo y las condiciones geométricas que conforman la zona de análisis. Generalmente, las incertidumbres que se generan en la definición de geometría y propiedades del suelo son más grandes que aquellas que dependen del método de cálculo que se selecciona para ser aplicado, es por esto que definir con precisión el esfuerzo de corte resistente es un aspecto crítico en todos los estudios de análisis de estabilidad (Fredlund & Krahn, 2011).

Si es el caso en que la rotura ya se ha producido, corresponde realizar un análisis posteriori para identificar los condicionantes de la rotura, en estos escenarios se podrá estudiar de mejor manera el comportamiento del suelo y proponer medidas correctoras adecuadas para mitigar el suceso (Ibáñez, 2018).

Teoría del Equilibrio Límite

Para la aplicación de estos métodos, se supone un mecanismo de falla a través del talud, a este se aplican los criterios de resistencia mecánica de cada material, entonces puede haber la probabilidad de que, con tal resistencia el mecanismo supuesto llegue a acontecer (Espinoza & Tapia, 2013).

Se interpreta que la rotura del terreno se produce cuando la masa del terreno se desplaza por encima de la superficie de rotura (Beltrán & Díaz, 2018).

Después de producirse la rotura el terreno se encuentra en equilibrio estático y en la longitud de la superficie de deslizamiento se encuentra movilizada la resistencia al corte.

La teoría del equilibrio límite se basa en el análisis de una masa de terreno inestable, en donde se compara las fuerzas que propician y las fuerzas que contrarrestan el movimiento del talud (Ibáñez, 2018).

Dependiendo del procedimiento de cálculo a aplicar o de la forma de la rotura, la masa de suelo sobre la superficie de rotura se establece como un único bloque o algunos, pero de menor tamaño, en donde cada uno de ellos cumpla el equilibrio estricto. El criterio de falla empleado se basa en el de Mohr - Coulomb (Ibáñez, 2018).

Factor de Seguridad

Se define al factor de seguridad como el valor que relaciona las condiciones que tiene el talud en la realidad, con las condiciones que lo llevan a la falla (Avila, 2008).

Este valor se determina mediante la selección del mínimo coeficiente de seguridad de todos los coeficientes asociados a todas las posibles superficies de deslizamiento.

Se reconoce que la resistencia al corte condiciona el resultado en la obtención del factor de seguridad en el análisis de estabilidad de taludes, y a su vez, este parámetro es el que más incertidumbre posee (Melentijevic, 2005).

A partir del valor que adquiera el factor de seguridad FS, se puede determinar si un talud se encuentra en condiciones estables o en condiciones inestables (Medina & Astudillo, 2013).

- Zonas estables: Valores de FS mayor a 1
- Zonas Inestables: Valores de FS menor a 1
- Zonas en punto de rotura: Valores de FS igual a 1.

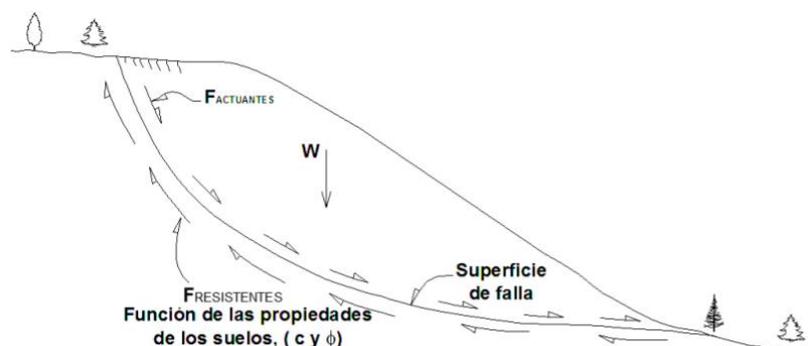
Superficie de Falla

En el momento que se presenta el movimiento de la masa de suelos ocurre el desplazamiento sobre un plano por el cual se define la falla. Se refiere como superficie de falla a la zona por donde se esperan los daños o la rotura del talud. En el análisis de estabilidad, la superficie de rotura se identifica en el modelo mediante la forma geométrica que más se adapte a las condiciones del talud o ladera en cuestión (Montoya, 2009).

El método del límite de equilibrio adopta un mismo valor a lo largo de todos los puntos de la superficie de la rotura, por lo que dicho valor se representa como el promedio de toda la región. De igual forma en el momento de una falla, el esfuerzo cortante será el mismo a lo largo de la superficie de la falla. En el análisis, por lo general, se determinan un número considerable de superficies de falla, para con estas encontrar el valor más bajo del factor de seguridad, ahí se representa la zona donde es más probable que ocurra un deslizamiento y se la denomina “superficie crítica de falla” (Suárez, 2009).

Figura 9

Esquema - Superficie de Falla



Nota. Tomado de (Montero, 2017).

Formas de la Superficie de Falla

Los métodos con procedimientos que toman en cuenta el equilibrio de fuerzas se emplean cuando el tipo de falla corresponde a un deslizamiento traslacional o rotacional, con superficies de falla de tipo circular o planar. Sin embargo, también se puede realizar el análisis de superficies de falla de tipo logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas (Montoya, 2009).

Análisis de Superficie Planas. En los casos donde se presenta una discontinuidad plana en la masa de suelo o macizo rocoso, por lo general se recurre al análisis de una falla de tipo traslacional. Por tal se considera que el movimiento del terreno se produce sobre una superficie

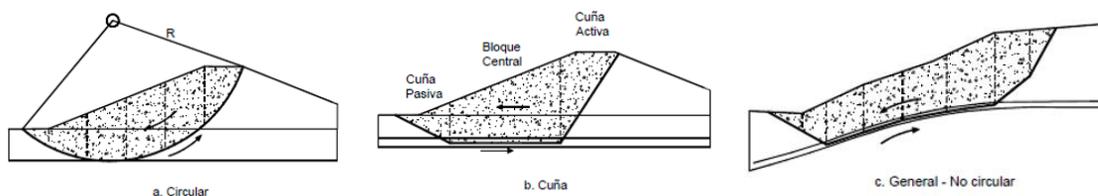
de falla planar. Esta adopta un deslizamiento del cuerpo rígido en toda la longitud de la intersección de ambos planos, tal como suele darse cuando existe falla en cuña (Castañón, 2007).

Análisis de Superficies Curvas. Para suelos blandos de menor resistencia y en rocas, suele formarse una superficie de falla curva, las cuales se las determinan como “círculos de fractura rotacional o circular” (Suárez, 2009). El cuanto al análisis de estabilidad se encuentra la zona de ubicación de la superficie de falla crítica y se determina el factor de seguridad en la longitud de esta, además el método más empleado para determinar este factor en este tipo de fallas es el de Mongenstern Price (Castañón, 2007).

Las Grietas de Tensión. Una grieta de tensión eleva las probabilidades de las masas de suelo a colapsar o fallar. La longitud de la superficie de falla se puede acortar en el plano donde se genera resistencia, consecuentemente la grieta se puede rellenar con agua. La lluvia puede crear una presión de poros temporal que afecta la estabilidad de la pendiente (Suárez, 2009).

Figura 10

Formas de la Superficie de Falla



Nota. Tomado de (U.S. Army Corps of Engineers, 2003).

Métodos de Análisis

Existe una amplia variedad de métodos de análisis para encontrar el factor de seguridad de un talud. El desarrollo de este trabajo se concentra en la teoría del equilibrio límite, específicamente en los métodos de Jambú, Spencer y Morgenstern – Price, que actualmente,

son los métodos más aplicados y aceptados gracias a que el coeficiente de seguridad que se obtiene no difiere considerablemente del valor real.

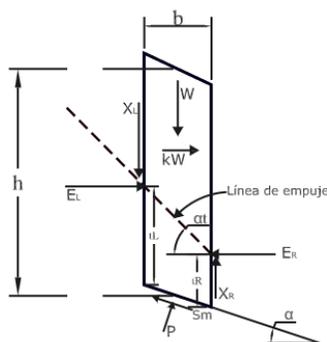
Existen muchas ventajas en la aplicación de los métodos de rebanadas, ya que además de facilitar el análisis de terrenos en el que el material no es homogéneo, alcanza una mejor aproximación en la distribución de tensiones normales a lo largo de la superficie de rotura (Quiñónez, 2011).

Método de Janbú. Este método se aplica a superficies de deslizamiento de cualquier forma. En este tipo de superficies el brazo de las fuerzas cambia, por lo que se debe valorar la ecuación del momento respecto al ángulo de cada bloque (Catanzariti, 2016).

Para evaluar las fuerzas internas cortantes es necesario determinar la ecuación del factor de seguridad. Se resuelve mediante iteraciones, en donde los cortantes internos son cero en la primera iteración y en las siguientes iteraciones se realiza sumatoria de momentos en la mitad de la base de cada dovela para obtener las fuerzas internas entre dovelas (Pesantez, 2010).

Figura 11

Dovela de Janbú



Nota. Tomado de (Pesantez, 2010).

Debido a que la solución de Janbú no satisface totalmente las condiciones de equilibrio de momentos, este método considera un factor de corrección que obedece a la curvatura que

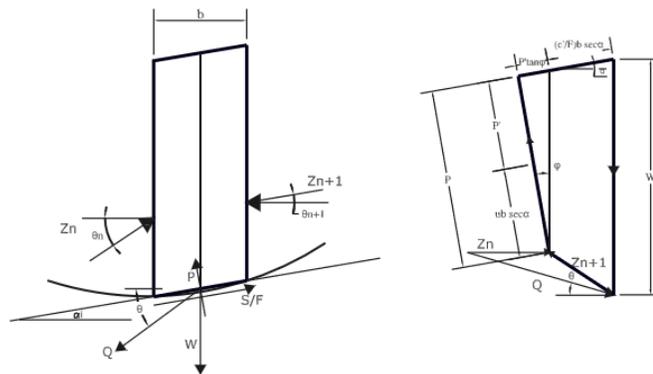
tenga la superficie de falla, para tomar en cuenta el posible error que se genera. Hay que considerar que los factores de seguridad que se obtienen con la aplicación de este método son bajos (Aguilar & Zúniga, 2015).

Método de Spencer. Este método supone que las fuerzas entre dovelas tienen el mismo ángulo de inclinación y satisface por completo el equilibrio de momentos y de esfuerzos. Se plantea una ecuación de equilibrio de fuerzas paralelamente a las fuerzas internas entre dovelas y otra ecuación de equilibrio de momentos con respecto a un punto común, las ecuaciones tendrán que ser resueltas para obtener el FS y el ángulo de inclinación de las fuerzas entre dovelas (Aguilar & Zúniga, 2015).

Como resolución de las ecuaciones se recurre a un sistema de prueba y error, en donde de forma repetitiva se toman valores hasta alcanzar un nivel aceptable de error.

Figura 12

Fuerzas del Método de Spencer



Nota. Tomado de (Pesantez, 2010).

El método de Spencer se puede aplicar a taludes con geometría de cualquier tipo y perfiles de suelo variados, el procedimiento de equilibrio para establecer factores de seguridad es sencillo y los resultados que se obtienen son precisos (Suarez, 1998).

Método de Morgenstern – Price. El análisis se aplica a superficies de rotura de forma cualquiera. Este método fragmenta la sección de material susceptible al movimiento en distintas rebanadas para determinar las tensiones normales que actúan en cada rebanada (Ibáñez, 2018).

La expresión propuesta por Morgenstern – Price para representar la relación entre las fuerzas actuantes entre dovelas se presenta de la siguiente manera en (Ibáñez, 2018).

$$\frac{X_i}{E_i} = \lambda \cdot f(x) \quad (1)$$

Donde:

X_i = Suma de tensiones tangenciales en las dos caras verticales de la dovela

E_i = Suma de las tensiones normales en las dos caras verticales de la dovela

λ = Incógnita a determinar, garantiza un sistema determinado con solución

$f(x)$ = Describe la relación entre las fuerzas actuantes a lo largo del talud

Se puede considerar la distribución de tensiones normales a los límites de los elementos al momento de seleccionar la función $f(x)$. Las tensiones efectivas de tracción deben ser nulas y las tensiones de corte deberán ser menores a las requeridas por el equilibrio crítico local (Avila, 2008).

Morgenstern – Price señalan claramente que el tipo de función elegida no afecta excesivamente a los factores de seguridad que se obtendrán como resultado de la aplicación del método, por lo que resta relevancia su selección (Ortuño, 2015).

Este método es capaz de satisfacer todas las ecuaciones de equilibrio, su aplicación requiere el uso de un ordenador para programar las complejas ecuaciones que se utilizan en la determinación del factor de seguridad como índice de estabilidad del talud (Melentijevic, 2005).

Antecedentes Investigativos de Laboratorio

Contenido de Humedad de los Suelos

El contenido de humedad en los suelos se refiere a la relación que existe entre el peso del agua y el peso de los sólidos (Polanco, 2012).

Se requiere conocer el contenido de humedad de un suelo para poder definir propiedades como la cohesión, consistencia y estabilidad mecánica (Botía, 2015).

Para encontrar el contenido de humedad de un suelo se aplica la siguiente fórmula propuesta en (ASTM Standard D2216, 1998).

$$\%h = \frac{Pa}{Ps} * 100 \quad (2) \quad Pa = Ph - Ps \quad (3)$$

Dónde:

%h = Porcentaje de humedad del suelo

Pa = Peso del agua

Ps = Peso del suelo en condiciones secas

Ph = Peso del suelo en condiciones húmedas

El procedimiento del ensayo viene detallado en (ASTM Standard D2216, 1998).

Peso Específico y Gravedad Específica

Se refiere a la relación que existe entre el peso y el volumen de los sólidos de un material. También se entiende a este término como la razón entre el peso de los sólidos y el peso de igual volumen de agua destilada a 4°C (Haro, 2014).

Se debe comprender la diferencia entre el término mencionado con la densidad del suelo, pues el último se refiere a la relación entre la masa y el volumen. Se aplica la fórmula propuesta en (ASTM Standard D854, 2001).

$$\gamma = \frac{Ps}{Vs} \quad (4)$$

Dónde:

γ = Peso específico de los sólidos

P_s = Peso que tienen los sólido

V_s = Volumen que tienen los sólido

El procedimiento del ensayo viene detallado en (ASTM Standard D854, 2001)

La gravedad específica comprende relacionar el peso específico de granos y el peso específico del agua, se comprueba que el peso específico de los granos y la gravedad específica tienen un mismo valor, difiriendo únicamente en que γ tiene unidades y G no (Haro, 2014).

$$G = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (5)$$

Dónde:

G = Gravedad específica de los sólidos

γ = Peso específico de los sólidos

γ_w = Peso específico del agua

Granulometría por Tamización

El ensayo de granulometría tiene por objetivo encontrar la clasificación del suelo de acuerdo a su graduación por lo que es necesario separar por tamaños las partículas gruesas y finas que componen la muestra de suelo en estudio (Polanco, 2012).

Este ensayo de laboratorio se requiere de mallas o tamices con aberturas cuadradas para separar las partículas de suelo por rangos de tamaños. Al agitar el material se separan las partículas en porciones, las cuales se pesan expresando dicho retenido como porcentajes en peso de la muestra total. Universalmente se ha establecido la malla No. 200 o 0,075mm como medida divisoria para clasificar y diferenciar los suelos finos y los suelos gruesos (Botía, 2015).

De los resultados que se obtienen, se procede a determinar el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura, el primero es la relación entre la abertura del tamiz a

través de la cual pasa el 60% del material, D_{60} , y la abertura del tamiz a través de la cual pasa el 10% del suelo, D_{10} . Mientras que el coeficiente de curvatura relaciona el D_{30} elevado al cuadrado y el producto entre D_{60} y D_{10} (Haro, 2014).

Como resultado de realizar esta práctica se obtiene la composición del material, que se expresa en forma de curva granulométrica dibujada en escala logarítmica.

El procedimiento del ensayo viene detallado en (ASTM Standard D422, 2002).

Límites de Consistencia

Este ensayo se utiliza obtener los límites del rango de humedad en el cual el suelo se mantiene en estado plástico y en estado líquido. Busca el contenido de agua en el punto de transición del estado semisólido a plástico y del estado plástico a líquido (Rodas & Torres, 2015).

Para realizar la clasificación de los suelos finos se utiliza los Límites de Atterberg que se definen de la siguiente manera:

Límite Líquido (LL). Se define como la frontera entre los estados semilíquido y plástico. Es la humedad necesaria para que la muestra falle en sus taludes, cerrándose la ranura longitudinal 13 milímetros al sufrir un impacto de 25 golpes consecutivos en la Copa de Casagrande (Polanco, 2012).

Límite Plástico (LP). Se define como la frontera entre los estados plástico y semisólido. Es la humedad que posee un cilindro de material de 11 centímetros de longitud y 3,2 milímetros de diámetro que, al rolarlo con la palma de la mano sobre una superficie lisa e impermeable como un vidrio, empieza a presentar agrietamientos en su estructura (Polanco, 2012).

Índice de Plasticidad (IP). Se refiere a la humedad natural sobre la cual el suelo era plástico. El índice de plasticidad se calcula restando el Límite líquido (LL) del Límite Plástico (LP).

El procedimiento del ensayo viene detallado en (ASTM Standard D4318, 2000).

Clasificación de los Suelos

En base a las características mecánicas, el comportamiento ingenieril y las propiedades similares que presentan los suelos, estos pueden clasificarse en grupos y subgrupos, que mediante un lenguaje común expresan de forma concisa las características generales de los suelos sin una descripción detallada (Braja M. Das, 2013).

Sistema Unificado de Clasificación de Suelo SUCS. En 1948, este sistema fue propuesto por Casagrande para ser utilizado en los trabajos de construcción del aeródromo, durante la Segunda Guerra Mundial (Braja M. Das, 2013).

El SUCS designa a los suelos con un símbolo conformado por dos letras, la primera considera el principal componente de la tierra, y la segunda describe información de la curva granulométrica o características de plasticidad del material en análisis (Borcelli, 2019).

El Sistema Unificado clasifica a los suelos en dos grandes categorías, la grava (G) y la arena (S) en estado natural, conforman la primera categoría denominada suelos de grano grueso y su característica principal es que un porcentaje menor al 50% del total pasa a través del tamiz número 200. La segunda categoría se denomina suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz número 200. Esta categoría está conformada por limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C), limos y arcillas orgánicas (O). Con respecto a la plasticidad utiliza las letras (L) para un límite líquido menor de 50 y (H) para un límite líquido mayor de 50 (Braja M. Das, 2013).

Actualmente, la clasificación de suelos de acuerdo al SUCS esta estandarizado en la (ASTM Standard D2487, 2000).

Permeabilidad de los Suelos

Se define como permeabilidad a la capacidad de un cuerpo, específicamente de un suelo, para conceder el paso del agua, limitando lo efectos que este proceso produzca en la

estructura interna del suelo. Se establece la propiedad como una carga de gradiente hidráulico sobre un área de suelo en una longitud conocida. (Gómez & Camelo, 2014).

Los factores más influyentes que determinar la permeabilidad de un suelo son la granulometría, ya que de esto depende el tamaño del grano y su distribución en el terreno, y la composición química del material o de su naturaleza mineralógica (Angelone et al., 2006). Para encontrar el coeficiente de permeabilidad se pueden realizar ensayos de laboratorio, ensayos de campo y método empíricos.

Permeámetro de Carga Constante. Se emplea este equipo para medir el volumen de agua que circula por medio de una muestra, en un recipiente de dimensiones conocidas en un tiempo determinado.

El nivel de entrada y salida de agua puede ser regulado, la carga h depende del nivel de agua en los conductos y el diámetro y largo de la muestra se miden. El agua que sale es recogida para ser medida en una probeta graduada (Angelone et al., 2006).

Se denomina k al coeficiente de permeabilidad:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * h} \quad (6)$$

Se establece:

k = coeficiente de permeabilidad

Q = Volumen de agua

L = Longitud entre medidores

A = Superficie transversal del espécimen

t = Tiempo en segundos de descarga

h = Altura de diferencia entre medidores

El procedimiento del ensayo viene detallado en (ASTM Standard D2434, 2000).

Compactación de los Suelos

Se entiende por compactación al proceso cuyo objetivo es reformar las partículas de suelo para conseguir una disminución del volumen de poros y con eso aumentar su densidad. Cuando se obtiene una mayor densidad como consecuencia se consigue una mayor capacidad o resistencia de soporte, de igual forma una menor permeabilidad (Cárdenas & Donoso, 2008).

Se identifican dos conceptos de suma importancia, el porcentaje de humedad óptimo y la densidad unitaria máxima seca. El primero se trata de la humedad presente en el suelo cuando se le aplica una energía de compactación y obtiene su valor más alto de densidad. el siguiente se refiere a la densidad máxima que se puede obtener con un contenido de humedad óptimo (López, 2020).

Ensayo Proctor Modificado Tipo A. Este ensayo se basa en procesos de compactación en laboratorio necesarios para encontrar la correspondencia de la densidad unitaria seca con un porcentaje de humedad de los suelos representados a través curva de compactación (ASTM Standard D1557, 2003).

El ensayo Proctor Modificado tipo A se lo realiza en un aparato circular de 2 plg de radio, con una muestra de suelo pasada por el tamiz N°4, que se compacta en 5 capas con 25 golpes por cada una empleando el golpe de un martillo de 44.5 N, que se eleva hasta los 457 mm, resultando en una energía de compactación $2\ 700\ \text{kJ/m}^3$ (Laboratorio de Mecánica de Suelos, 2006).

El ensayo consiste en aplicar un determinado contenido de humedad creciente a la muestra de suelo y una determinada cantidad de energía de compactación. Básicamente el agua sirve como lubricante entre las partículas de suelo lo que incrementa su densidad, hasta el punto donde el agua deja de desplazar aire para desplazar las mismas partículas de suelo incrementando su volumen y bajando su densidad (Cárdenas & Donoso, 2008).

El procedimiento que se muestra en la (ASTM Standard D1557, 2003) menciona que para cada compactación se pesa el molde para poder obtener densidad y se determinar su humedad, este proceso se repite hasta que el peso del molde se equilibre o en su defecto sea menor que la medida anterior.

Resistencia al Cortante de los Suelos

La resistencia interior por unidad de área que posee un suelo para contrarrestar los esfuerzos y el desplazamiento hacia la longitud de una superficie que pretenden una falla, es conocida como la resistencia al esfuerzo cortante del suelo (Pineda et al., 2014).

Se puede determinar estos parámetros mediante ensayos en campo o en laboratorio, siendo el primero más idóneo si se requiere obtener un valor más ajustado a la realidad. En laboratorio, el ensayo de compresión triaxial y el ensayo de corte directo son los más comunes para establecer estas variables en un análisis de estabilidad de taludes.

Triaxial. Este ensayo es considerado el procedimiento más confiable para obtener los valores del esfuerzo cortante del suelo. Se confiabilidad viene dada por el hecho de que se puede controlar las tensiones principales que se aplican, así como también el drenaje y la presión intersticial, llegando a conocer el comportamiento básico del suelo y de sus características que se emplearan en un posterior diseño (Salas, 2011).

El procedimiento del ensayo se trata de someter a un espécimen de forma cilíndrica revestido de una membrana de látex, con una relación de altura/diámetro de dos (ASTM Standard D2850, 2003). Esta probeta es confinada por medio de una presión hidráulica constante y sometida a una carga vertical creciente a una velocidad constante hasta que se produzca la rotura (Mecanica Cientifica S.A, 2016).

No Consolidado No Drenado UU. Se denomina prueba rápida, donde no se permite en ninguna instancia de la prueba la consolidación de la muestra. No se permite el drenaje para lo

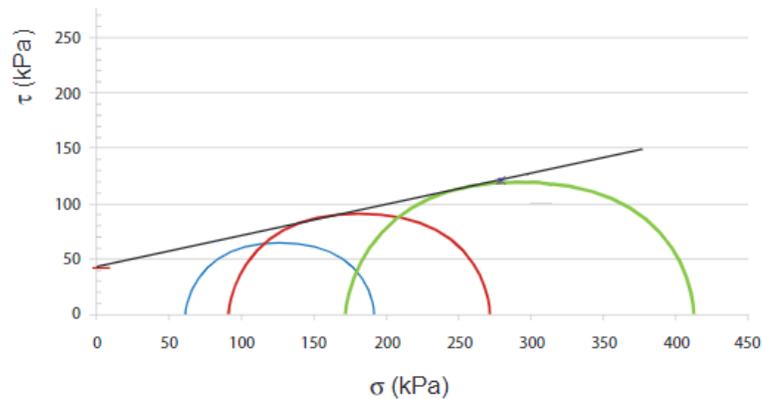
cual la válvula de comunicación entre la probeta y el sistema de drenaje. Al iniciar se aplica una presión hidrostática de forma consecuente se hace fallar a la muestra mediante una aplicación rápida pero constante de la carga axial (Salas, 2011).

A lo largo del procedimiento se miden las deformaciones producidas en el espécimen correspondientes a la carga aplicada en ese instante. Estos datos son necesario para representar la relación Tensiones vs Deformaciones. Este procedimiento se repite en 3 probetas iguales, pero con un cambio en la presión de confinamiento (Mecanica Cientifica S.A, 2016).

Con estos resultados se realiza la construcción de la gráfica de los círculos de Mohr, posterior se realiza una aproximación llamada la envolvente de dichos círculos para encontrar la cohesión (c) y el ángulo de rozamiento interno (Mecanica Cientifica S.A, 2016).

Figura 13

Círculos de Falla Mohr - Coulomb



Nota. Tomado de (Salas, 2011).

Corte Directo. A través de un plano de localización predeterminado, se provoca la ocurrencia de una falla. Sobre el plano citado actúan un esfuerzo normal aplicado externamente y un esfuerzo cortante (Bowles, 1981).

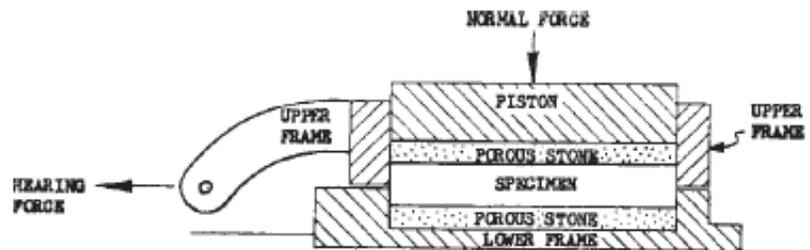
Este método, para determinar los parámetros de resistencia al corte, se realiza mediante la deformación de un espécimen en un rango de deformación controlada. El

procedimiento se ejecuta como mínimo en tres pruebas y se aplica una diferente carga normal en cada una de ellas. A partir de las envolventes de resistencia de la teoría de Mohr, se mide el efecto de la carga normal sobre la resistencia al corte y a la deformación (ASTM Standard D3080, 2003).

El procedimiento del ensayo consiste en ubicar el espécimen en una caja de cizalladura directa y se consolida el espécimen bajo la aplicación del esfuerzo normal determinado. Después se sueltan los marcos que están encargados de contener la muestra y se desplaza un marco horizontalmente respecto al otro, a una velocidad constante de deformación. A medida que la muestra es cizallada se procede a computar la fuerza de cizalladura y los desplazamientos horizontales (Ensayo de Corte Directo, s.f.)

Figura 14

Caja de Corte Directo



Nota. Tomado de (ASTM Standard D3080, 2003).

Capítulo III

Metodología

- Cuantitativa - Experimental

La metodología que se desarrolla en el presente trabajo es de tipo cuantitativa, pues permitirá alcanzar resultados numéricos lógicos a partir de datos y estudios basados en cantidades y métodos estructurados. La investigación es experimental por tener un enfoque científico que incluye pruebas de laboratorio que se realizan bajo condiciones científicamente aceptables.

Propiedades Índice de los Suelos

Ensayos Clasificación de los Suelos SUCS

- Contenido de Humedad ASTM D 2216
- Análisis Granulométrico ASTM D 422
- Límites Líquido y Plástico ASTM D 4318

Ensayo Peso Específico de los Suelos

- Peso Específico De Los Sólidos Del Suelo Mediante Picnómetro De Agua ASTM D 854

Ensayo Permeabilidad de los Suelos

- Permeámetro de carga constante ASTM D 2434

Ensayo Compacidad de los Suelos

- Proctor Modificado ASTM D 1557

Propiedades Mecánicas de los Suelos

Ensayos Resistencia al Corte de los Suelos

- Triaxial No Consolidado No Drenado UU ASTM D 2850
- Corte Directo Y Carga Residual ASTM D 3080

Modelo Conceptual de los Mecanismos de Falla

La elaboración del modelo conceptual, como actividad fundamental previa al diagnóstico y estabilización de los problemas del deslizamiento, se desarrolla en base al procedimiento que propone (Suarez Díaz, 2003). Esta metodología contempla básicamente tres actividades que se detallan a continuación:

Recolección de Datos para el Desarrollo del Modelo

Mediante investigación de bibliografía existente del sitio o sectores aledaños, investigación de laboratorio, visitas exploratorias de campo y entrevistas con los pobladores del cantón Chunchi, se recolecta información y características relevantes de los elementos que influyen directamente en el comportamiento del deslizamiento y el entorno de análisis.

Caracterización y Descripción Escrita de los Elementos Fundamentales

Factores propios de la zona de análisis como la litología, estructura geológica, geomorfología, meteorización, topografía, clima e hidrogeología, efecto antrópico, entre otros, son considerados elementos fundamentales que se deben tomar en cuenta en la elaboración de un modelo conceptual de deslizamiento. Se elabora de forma descriptiva el efecto que tiene cada uno de los factores o elementos constitutivos en la estabilidad de una ladera o talud (Suarez Díaz, 2003).

Representación Gráfica de las Características de los Elementos Fundamentales

Se elabora un modelo gráfico que refleje la información relevante del conjunto de elementos fundamentales y que son determinantes en el proceso de inestabilidad. Además, se debe incluir la interacción que existe entre ellos para desatar siniestros como el que se analiza en el presente trabajo.

Modelo Matemático Usando Software

Como resultado del modelo conceptual, se elabora el modelo matemático para determinar los factores de seguridad en los sitios de interés. Las zonas de análisis se establecen debido a la susceptibilidad del terreno a un posible deslizamiento. Se precisan 3 perfiles para realizar el estudio, tomando en cuenta diversos factores entre cuales se destaca la topografía, pendiente del terreno y la cercanía de sitio en cuestión al deslizamiento principal.

Para el análisis de estabilidad se establece dos condiciones en cada uno de los perfiles: estáticas y pseudo estáticas. En la última que considera condiciones sísmicas, se determina el coeficiente de aceleración sísmico horizontal y vertical de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 15.

$$k_h = 0,6(a_{m\acute{a}x})/g \quad (7)$$

$$a_{m\acute{a}x} = Z * Fa \quad (8)$$

$$k_v = \frac{1}{2} k_h \quad (9)$$

Donde:

k_h = coeficiente sísmico horizontal

k_v = coeficiente sísmico vertical

$a_{m\acute{a}x}$ = aceleración máxima horizontal

Z = factor de zona

Fa = factor de amplificación o reducción dinámica asociado

(NEC -SE -GC Geotécnica y Cimentaciones, 2015)

Los valores calculados son 0,26 horizontal y 0,13 vertical referente a las condiciones sísmicas que se presentan en el cantón Chunchi, provincia de Chimborazo.

Por estar al alcance de esta investigación y ser los modelos de análisis más usadas en el medio, los métodos de equilibrio límite que se utilizan en el presente trabajo para determinar los factores de seguridad y la condición de estabilidad en cada uno de los taludes son:

- Janbú
- Spencer
- Morgenstern – Price

Análisis Regresivo de Factores de Seguridad

Se elabora un análisis de estabilidad de taludes de la superficie del cuerpo del deslizamiento para establecer los parámetros de resistencia al corte con los cuales se puede establecer condiciones de estabilidad al terreno. (Escobar & Escobar, 2017).

Para lo cual se realiza un análisis retrospectivo de estabilidad del talud en cuestión, este consiste en el cálculo del factor de seguridad para una serie de pares de valores de c (cohesión) y ϕ (ángulo de fricción), hasta obtener un valor de FS mayor a la unidad para que se considere una zona estable (Acevedo et al., 1981).

Los parámetros que se varían son los correspondientes a la primera capa del perfil puesto que en esta se realizarán los posteriores trabajos para dar estabilidad al talud.

Se usan como valores iniciales del análisis los correspondientes a la resistencia al corte residual del material de la primera capa, determinados por los ensayos de corte directo, debido a que este se encuentra ya fallado.

De igual forma se realiza el análisis con 3 métodos de equilibrio límite para determinar los factores de seguridad y las condiciones de estabilidad de los taludes, los cuales son:

- Janbú
- Spencer
- Morgenstern – Price

Capítulo IV

Resultados

Puntos Estratégicos para el Muestreo de Suelos

Los sitios para recolectar las muestras de suelo han sido seleccionados en base a la inspección manual visual realizada en campo. Se evidencia visualmente dos distintas tonalidades en los suelos que conforman el flanco derecho y el flanco izquierdo del deslizamiento. Los taludes en los flancos son considerados puntos estratégicos en la recolección de muestras necesarias para la investigación de laboratorio que el proyecto requiere.

Figura 15

Vista Frontal del Deslizamiento de Chunchi



Descripción Manual Visual del Flanco Izquierdo

Este flanco corresponde al sector “La Armenia” y se constituye de suelo con tonalidad gris, conformado por depósitos de tobas volcánicas. En este suelo no se encuentra ninguna clase de roca grande que pueda aportar en su resistencia al corte, además no existe ningún tipo de vegetación con raíces profundas que logren sostener este tipo de material.

Es importante recalcar que la mayor parte de la zona estudiada presenta estas características, razón por la cual se decide recolectar muestras en dos taludes del flanco derecho que desde este apartado se identifican como Talud 1 y Talud 2.

Descripción Manual Visual del Flanco Derecho

El flanco izquierdo del deslizamiento corresponde al sector “La Primavera” y visualmente se constituye de suelo con tonalidad blanco - amarillento. Por las características que se observaron en campo, se puede decir que el suelo es de tipo limoso arenoso muy poco cohesivo; las muestras se recolectaron en el talud del flanco izquierdo que desde este apartado se identifica como Talud 3.

Se procede a realizar la extracción de muestras alteradas e inalteradas en los tres taludes considerados como representativos. Las muestras alteradas, a partir de los ensayos, permiten establecer las propiedades físicas de los suelos; mientras que las muestras inalteradas se utilizarán en la ejecución de ensayos que determinen los parámetros de resistencia al corte de los suelos.

Caracterización de Suelos

Talud 1 UTM 729761.1 E 9746532.2 N

Muestra Alterada M1. Profundidad 5 metros

Clasificación de Suelos Norma SUCS

Tabla 1

Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M1

Clasificación de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	17,24	%
Límite líquido	ASTM D 4318	28	%
Límite plástico	ASTM D 4318	27	%
Índice de plasticidad	-	1	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	38%
		% Arena	36%
		% Finos	26%
Clasificación SUCS		Arena limosa SM	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma D 854-58

Tabla 2

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M1

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,685	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,690	-

Muestra Alterada M2. Profundidad 7 metros

Clasificación de Suelos Norma SUCS

Tabla 3

Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M2

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	13,83	%
Límite líquido	ASTM D 4318	27	%
Límite plástico	ASTM D 4318	26	%
Índice de plasticidad	-	1	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	37%
		% Arena	43%
		% Finos	20%
Clasificación SUCS		Arena limosa SM	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58

Tabla 4

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M2

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,611	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,614	-

Muestra Alterada M3. Profundidad 9 metros

Clasificación de Suelos Norma SUCS

Tabla 5

Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M3

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	18,37	%
Límite líquido	ASTM D 4318	44	%
Límite plástico	ASTM D 4318	21	%
Índice de plasticidad	-	23	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	31%
		% Arena	34%
		% Finos	35%
Clasificación SUCS		Arena arcillosa SC	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58

Tabla 6

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M3

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,413	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,418	-

Talud 2 UTM 729996.1 E 9746649.8 N

Muestra Alterada M4. Profundidad 1 metro

Clasificación de Suelos Norma SUCS

Tabla 7

Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M4

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	5,68	%
Límite líquido	ASTM D 4318	32	%
Límite plástico	ASTM D 4318	22	%
Índice de plasticidad	-	10	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	6%
		% Arena	22%
		% Finos	72%
Clasificación SUCS		Arcilla media plasticidad con arena CL	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58

Tabla 8

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M4

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,265	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,270	-

Muestra Alterada M5. Profundidad 3 metros

Clasificación de Suelos Norma SUCS

Tabla 9

Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M5

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	4	%
Límite líquido	ASTM D 4318	30	%
Límite plástico	ASTM D 4318	26	%
Índice de plasticidad	-	4	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	24%
		% Arena	46%
		% Finos	30%
Clasificación SUCS		Arena limosa SM	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58

Tabla 10

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M5

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,698	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,703	-

Muestra Alterada M6. Profundidad 8 metros

Clasificación de Suelos Norma SUCS

Tabla 11

Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M6

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	7,78	%
Límite líquido	ASTM D 4318	30	%
Límite plástico	ASTM D 4318	25	%
Índice de plasticidad	-	5	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	28%
		% Arena	41%
		% Finos	31%
Clasificación SUCS		Arena limosa SM	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58

Tabla 12

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M6

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,707	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,712	-

Talud 3 UTM 729515.6 E 9746916.2 N**Muestra Alterada M7.** Profundidad 1 metro**Clasificación de Suelos Norma SUCS****Tabla 13***Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M7*

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	30,39	%
Límite líquido	ASTM D 4318	38	%
Límite plástico	ASTM D 4318	32	%
Índice de plasticidad	-	6	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	32%
		% Arena	43%
		% Finos	26%
Clasificación SUCS		Arena limosa SM	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58**Tabla 14***Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M7*

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,703	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,708	-

Muestra Alterada M8. Profundidad 2 metros**Clasificación de Suelos Norma SUCS****Tabla 15***Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M8*

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	28,05	%
Límite líquido	ASTM D 4318	39	%
Límite plástico	ASTM D 4318	22	%
Índice de plasticidad	-	17	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	46%
		% Arena	40%
		% Finos	14%
Clasificación SUCS		Arena arcillosa SC	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58

Tabla 16

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M8

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,656	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,661	-

Muestra Alterada M9. Profundidad 3 metros

Clasificación de Suelos Norma SUCS

Tabla 17

Clasificación de Suelos SUCS Muestra Alterada M9

Clasificación de los Suelos SUCS			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Humedad	ASTM D 2216	30,22	%
Límite líquido	ASTM D 4318	39	%
Límite plástico	ASTM D 4318	24	%
Índice de plasticidad	-	15	%
Granulometría	ASTM D 6913	% Gravas	38%
		% Arena	37%
		% Finos	25%
Clasificación SUCS		Arena arcillosa SC	

Peso Específico y Gravedad Específica Norma ASTM D 854-58

Tabla 18

Peso Específico – Gravedad Específica Muestra Alterada M9

Peso Específico de los Suelos			
Ensayo	Normativa	Resultado	Unidad
Peso Específico	ASTM D 854-58	2,457	gr/cm ³
Gravedad Específica	ASTM D 854 -58	2,462	-

Tabulación de Resultados

Tabla 19

Resultados Obtenidos para Clasificación de los Suelos

Talud	Prof	%W	%LL	%LP	%IP	% Grava	% Arena	% Finos	Peso Esp.	Clasificación SUCS
Talud 1	5 m	17,24	28	27	1	38	36	26	2,685	SM Arena Limosa
	7 m	13,83	27	26	1	37	43	20	2,611	SM Arena Limosa
	9 m	18,37	44	21	23	31	34	35	2,413	SC Arena Arcillosa
Talud 2	1 m	5,68	32	22	10	6	22	72	2,265	CL Arcilla media plasticidad con arena
	3 m	4,00	30	26	4	24	46	30	2,698	SM Arena Limosa
	8 m	7,78	30	25	5	28	41	31	2,707	SM Arena Limosa
Talud 3	1 m	30,39	38	32	6	32	43	26	2,703	SM Arena Limosa
	2 m	28,05	39	22	17	46	40	14	2,656	SC Arena Arcillosa
	3 m	30,22	39	24	15	38	37	25	2,457	SC Arena Arcillosa

Contenido de humedad: Los resultados del contenido de humedad de los suelos tomados en los taludes 1 y 2 muestran un valor alto a pesar de que las condiciones ambientales del sitio al momento de la recolección de muestras no eran de precipitación.

Granulometría y límites de consistencia: Siguiendo la metodología de la clasificación SUCS y con los resultados obtenidos en la curva granulométrica y límites de consistencia, se determinaron los suelos de análisis como arenas limosa SM y arenas arcillosa SC.

Parámetros de Resistencia al Corte

Talud 1 UTM 729761.1 E 9746532.2 N

Muestra Alterada M1. Profundidad 5 metros

Tabla 20

Resultados Corte Directo Muestra Alterada M1

Esfuerzo Cortante Pico		
Ángulo de fricción interna	16,64	°
Cohesión	0,32	kg/cm ²
Esfuerzo Cortante Residual		
Ángulo de fricción interna	15,88	°
Cohesión	0,24	kg/cm ²

Muestra Alterada M2. Profundidad 7 metros

Tabla 21

Resultados Corte Directo Muestra Alterada M2

Esfuerzo Cortante Pico		
Ángulo de fricción interna	22.04	°
Cohesión	0,37	kg/cm ²
Esfuerzo Cortante Residual		
Ángulo de fricción interna	19.89	°
Cohesión	0,31	kg/cm ²

Muestra Alterada M3. Profundidad 9 metros

Tabla 22

Resultados Corte Directo Muestra Alterada M3

Esfuerzo Cortante Pico		
Ángulo de fricción interna	26,52	°
Cohesión	0,94	kg/cm ²
Esfuerzo Cortante Residual		
Ángulo de fricción interna	26,16	°
Cohesión	0,79	kg/cm ²

Talud 3 UTM 729515.6 E 9746916.2 N**Muestra Alterada M7. Profundidad 1 metro****Tabla 23***Resultados Corte Directo Muestra Alterada M7*

Esfuerzo Cortante Pico		
Ángulo de fricción interna	17,49	°
Cohesión	0,58	kg/cm ²
Esfuerzo Cortante Residual		
Ángulo de fricción interna	14,47	°
Cohesión	0,58	kg/cm ²

Muestra Alterada M8. Profundidad 2 metros**Tabla 24***Resultados Corte Directo Muestra Alterada M8*

Esfuerzo Cortante Pico		
Ángulo de fricción interna	18,87	°
Cohesión	0,65	kg/cm ²
Esfuerzo Cortante Residual		
Ángulo de fricción interna	13,43	°
Cohesión	0,67	kg/cm ²

Muestra Inalterada MT3. Profundidad 3 metros**Tabla 25***Resultados Triaxial UU Muestra Inalterada MT3*

Resultados del Ensayo	
Compresión no confinada	3,13 kg/cm ²
Ángulo de Fricción	8,32°
Cohesión	1,36 kg/cm ²

Tabulación de Resultados**Tabla 26***Resultados Obtenidos para Parámetros de Resistencia al Corte*

Talud	Profundidad	Cohesión (kg/cm ²)		Ángulo de Fricción (°)		Observación
		Pico	Residual	Pico	Residual	
Talud 1	5 m	0,32	0,24	16,64	15,88	Corte Directo
	7 m	0,37	0,31	22,04	19,89	Corte Directo
	9 m	0,94	0,79	26,52	26,16	Corte Directo
Talud 3	1 m	0,58	0,58	17,49	14,47	Corte Directo
	2 m	0,65	0,67	18,87	13,43	Corte Directo
	3 m		1,36		8,32	Triaxial UU

Permeabilidad Norma ASTM D 2434**Tabulación de Resultados****Tabla 27***Resultados Obtenidos para Permeabilidad de los Suelos*

Talud	Profundidad	K (cm/seg)	Grado de Permeabilidad
Talud 1	15 m	$3,0 \times 10^{-5}$	Baja
Talud 2	15 m	$2,8 \times 10^{-5}$	Baja
Talud 3	3 m	$1,2 \times 10^{-5}$	Baja

Los valores corresponden a un grado de permeabilidad baja, el valor k de $1,2 \times 10^{-5}$ se encuentran entre el rango de 1×10^{-3} a 1×10^{-5} . Cabe recalcar que los ensayos se realizaron con las muestras recolectadas a más profundidad por lo que los valores de permeabilidad resultan ser bajos, estos pueden subir al realizar el ensayo con suelos más superficiales.

Compactación Norma ASTM D 1557 - 12

Tabulación de Resultados

Tabla 28

Resultados Obtenidos para Densidad Seca Máxima y Humedad Óptima de los Suelos

Talud	Profundidad	Densidad Seca Máxima (g/cm ³)	Humedad Óptima %
Talud 1	9 m	1,634	17,0
	15 m	1,558	19,0
Talud 2	3 m	1,651	16,0
	8 m	1,778	14,8
Talud 3	1 m	1,639	18,0
	2 m	1,598	22,0
	3 m	1,708	16,3

Los resultados del ensayo de compactación establecen que las muestras de suelo de estudio tienen una relación de densidad seca máxima entre 1.55 a 1.77 g/cm³ correspondientes a valores de humedad óptima entre 16 - 22%.

Componentes del Deslizamiento que Resultan de Ensayos de Campo y Sondeos de Geofísica

Tipos de Movimiento

Por la magnitud del siniestro ocurrido, se evidencia claramente que existió una combinación de movimientos dentro del área que abarca la zona del deslizamiento. Por la forma circular cóncava de las fallas, se identifica que en la sección superior el movimiento predominante fue de tipo rotacional con respecto a un eje paralelo a la superficie y además se observa la acumulación de material al pie del escarpe. Se establecen dos movimientos de masa de tipo rotacional de gran magnitud, el principal se origina en la corona del deslizamiento en dirección oeste, y el segundo en la parte superior del flanco izquierdo en dirección noroeste.

En el costado derecho del deslizamiento se presenta también movimientos de masa de tipo rotacional, pero de pequeña magnitud con dirección de desplazamiento hacia el oeste.

En este mismo flanco, un tipo de movimiento que involucra grandes áreas del terreno se identifica como una reptación gravitacional relacionada con el gran contenido de agua en los suelos que sumado a las pendientes pronunciadas del terreno origina movimientos más rápidos como lo son los flujos de agua y suelo que se evidencian desde la base de los deslizamientos rotacionales de mayor envergadura hacia toda la sección inferior del deslizamiento.

La reptación gravitacional se da con dirección de desplazamiento hacia el suroeste. Por último, el movimiento de tipo flujo comienza en el pie de los deslizamientos rotacionales y por efectos de la gravedad se condujeron en dirección oeste y noroeste.

La descripción de este apartado se plasma en la elaboración del modelo del movimiento del deslizamiento de Chunchi. (Ver Anexo 1)

Superficie de Falla Bajo el Movimiento

En este apartado los autores se permiten citar los sondeos de geofísica que fueron realizados en campo, y que después del procesamiento de datos especifican que el espesor del estrato de suelo movido es de 17 metros haciendo referencia de que a esa profundidad se establece la ubicación de la superficie de falla bajo el movimiento.

Se debe considerar que la profundidad del estrato movido es de 17 metros en la sección longitudinal tomada, esta puede variar dependiendo del lugar donde se realice el sondeo de geofísica.

Esta descripción se plasma en la elaboración de un perfil en corte con coordenadas x - y de distancia y altura correspondiente a las cotas de terreno, el perfil intenta reflejar los resultados obtenidos a partir de los sondeos de geofísica. (Ver Anexo 2)

Modelo Conceptual

Litología

De acuerdo al mapa litológico que presenta el Instituto de Investigación Geológico y Energético, el sector donde ocurrió el deslizamiento se destaca por estar constituido por rocas volcánicas indiferenciadas, cubiertos por depósitos de tipo coluvial compuestos por materiales poco cohesivos y arcillas residuales producto de la meteorización. (Dunkley & Gaibor, 1997)

En base a las observaciones de campo y los perfiles de suelo elaborados en el desarrollo del proyecto, se logra apreciar dos diferentes estados del material que conforma la zona del deslizamiento de Chunchi, dividiéndose así el análisis de la litología en dos flancos estratégicos, el derecho y el izquierdo.

En el talud en estudio del flanco derecho se distingue un horizonte de suelo de 1 metro, que presenta limos poco consolidados de color rojizo de baja compresibilidad con plasticidad media; la humedad que aparenta es baja. Luego se encuentra un horizonte de aproximadamente 2 metros de una matriz arena arcillosa de color café amarillento de baja compresibilidad con plasticidad media y clastos milimétricos de rocas volcánicas, se distingue en el talud fragmentos milimétricos y centimétricos de andesitas meteorizadas.

Para determinar la clasificación de suelos en el flanco derecho se realizan ensayos de laboratorio que entregan los siguientes resultados:

- Clasificación SUCS: A la profundidad de 1 metro el suelo corresponde a una arena limosa (SM), a más profundidad el suelo se caracteriza como una arena arcillosa (SC)
- Peso específico: En un rango de $[2,5 - 2,7] \text{ g/cm}^3$

En el flanco izquierdo se aprecian horizontes de suelo de hasta 7 metros, que presentan limos color café moderadamente consolidado con clastos milimétricos de rocas de composición volcánica, baja compresibilidad con plasticidad baja y altamente saturado. A mayor profundidad

los clastos presentan mineralización clorita y alteración a caolín, también se distingue matriz suelta de arena arcillosa color café grisácea de baja compresibilidad con plasticidad media más o menos saturada.

Los suelos del flanco izquierdo se clasifican de la siguiente manera:

- Clasificación SUCS: Arena limosa (SM), Arena arcillosa (SC), Arcilla media plasticidad con arena (CL)
- Gravedad específica: En un rango de $[2,3 - 2,7]$ g/cm³

Estructura Geológica

Cada formación geológica dependiendo de sus características tiene un definido grado de susceptibilidad frente a un movimiento de ladera, en esto radica la importancia de la determinación de los estratos geológicos de la zona de estudio. La estructura geológica correspondiente al área del deslizamiento está constituida en sus estratos más profundos por la Formación Cisarán y la Unidad Puñay. En sus estratos superiores se componen de Cangagua y depósitos superficiales.

La Unidad Puñay comprende lavas andesíticas, brechas, areniscas y limolita. Estas rocas se encuentran fisuradas producto de la meteorización y con cierta estratificación. La Formación Cisarán está conformada por lavas volcánicas, aglomerados andesíticos y riolitas. Al N y O de Alausí la secuencia se encuentra fallada y virada con buzamientos de hasta 70°. (Dunkley & Gaibor, 1997)

Los estratos descritos corresponden a macizos geológicos con evidencia de fracturamiento y descomposición de la roca debido a proceso de desgaste por meteorización y por la presencia de fallas.

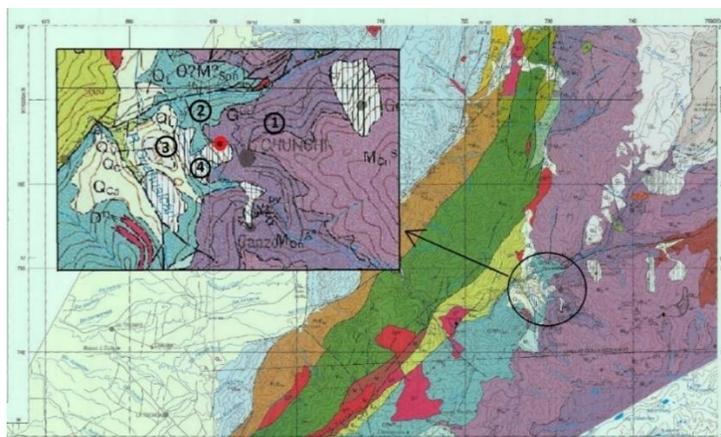
La cangagua corresponde a una toba terrosa de color café oscuro intercalada con ceniza volcánica y piroclásticos. Este tipo de suelo es bastante resistente a la compresión, pero muy

susceptible a la erosión desencadenada por agua y viento. (Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, 1975). Los depósitos lacustres jóvenes incluyen arenas, conglomerados y tobas finas. Estos estratos al ser capas superficiales tienen una interacción con los factores ambientales y fenómenos naturales que pueden reducir la resistencia del suelo y lo hace susceptible a movimientos de tierra.

Entre las capas profundas y los estratos superficiales existen un plano de cambio de litología del material, este factor es importante para la ocurrencia de un deslizamiento puesto que se genera un cambio en la resistencia entre los materiales. Además, se encuentra una zona aledaña con una serie de derrumbes y deslizamientos anteriores a lo largo del río, que indican la susceptibilidad de la zona frente a este tipo de movimiento.

Figura 16

Estratos Geológicos de la Zona del Deslizamiento



Nota. * Coordenada de referencia del deslizamiento 1. Formación Cisarán 2. Unidad Puñay Piñón 3. Depósitos superficiales 4. Derrumbes y deslizamiento de terreno. Modificado de (Dunkley & Gaibor, 1997)

Geomorfología

El cantón de Chunchi se encuentra ubicado en las estibaciones occidentales de la cadena montañosa andina, en la región donde se unen la cordillera central y la cordillera occidental;

cabe mencionar que en esta región desaparece la depresión o valle interandino. En la parte baja predominan valles en forma de V y en la parte alta valles en forma de U.

Debajo de los 3000 m.s.n.m, en donde se sitúa específicamente la zona de estudio, la topografía es abrupta, los ríos angostos y profundos. Existe una activa erosión en profundidad, superior a la lateral, esto se evidencia en los cortes transversales que tienen forma de V y surgen en condiciones de levantamiento continuo de la región. (Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, 1975)

El sitio presenta una morfología con escarpes bien diferenciados en los flancos del deslizamiento. Los escarpes principales del flanco izquierdo y derecho poseen una pendiente de $69,6^\circ$ y $37,9^\circ$, respectivamente. Que, sumadas a la elevación, el constante proceso de movimiento que sufre el terreno y las pendientes abruptas de las laderas y taludes que conforman el lugar, se puede considerar a esta zona como muy susceptible a deslizamientos.

Además de los escarpes principales, se destaca también la presencia de varios escarpes secundarios en el cuerpo del deslizamiento como se indica en la imagen.

Figura 17

Ubicación de los Escarpes en el Deslizamiento



Meteorización

En la zona de estudio se evidenció dos tipos de descomposición de roca, la meteorización mecánica causada por factores físicos que produce disgregación y la meteorización química producto de una transformación química ocasionando descomposición.

El desgaste de las rocas en el sector se da por agentes externos como el clima y las precipitaciones, y también debido a su composición de origen volcánico. Las rocas andesíticas se encuentran alteradas y son sensibles a la meteorización por los agentes antes mencionados.

La meteorización mecánica produce la desintegración de los minerales presentes se da en cierta medida por el cambio de temperatura. Estos aumentan su volumen con una temperatura alta y lo disminuyen con temperaturas bajas, que produce una disgregación del material.

La meteorización química en el caso de la zona se da por la presencia de agua en los estratos de suelo por las precipitaciones del sitio. En las visitas al terreno se apreciaron claramente las afectaciones de este tipo, a medida que se asciende se puede evidenciar como la roca se va desfragmentando, quedando en las cotas superiores un horizonte de suelo residual. Este factor es importante en la estabilidad del terreno.

Cuanto más avanzado son los procesos de meteorización más se eleva la porosidad permeabilidad, lo que genera mayor deformabilidad del macizo rocoso por lo su resistencia disminuye. Haciendo más susceptible al material a las afectaciones por el agua y clima.

El grado de meteorización evidenciado en la zona de estudio se lo caracterizó como “Muy Meteorizada” de grado IV de acuerdo con la tabla dispuesta por (ISRM, 1981). El material rocoso aparece desintegrado o convertido en suelo en una proporción mayor al 50%.

El grado de alteración de las paredes del macizo rocoso se determina en un grado alto donde la pared se encuentra casi en su totalidad alterada con respecto a su matriz de roca.

Tectónica y Fracturación

Como se citó con anterioridad, Chunchi se asienta donde se unen la Cordillera Central y la Cordillera Occidental que se desarrollaron mediante el proceso de subducción inducido a procesos de metamorfismo, magmatismo y volcanismo. En este tramo la Cordillera de los Andes cambia de rumbo de NNE-SSW a NNW-SSE. (Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, 1975)

Los basamentos de la Cordillera Central se describen en cinco divisiones litotectónicas, estas son: Guamote, Alao, Loja, Salcedo y Zamora. Las divisiones litotectónicas están separadas por sistemas de fallas regionales: Falla Peltetec, Frente Baños, Falla Llanganates y Falla Cosanga. (Cajas, 2017)

Fallas, fracturas y plegamientos se encuentran cubiertos por las formaciones cuaternarias, razón suficiente para justificar la ausencia de fracturaciones o discontinuidades relacionadas con la tectónica que caracteriza al lugar en donde se realizó el recorrido de campo.

El área de influencia y las zonas colindantes presentan grandes grietas que indican rasgos de inestabilidad y que todo el sector se sigue moviendo por la pérdida de sostenimiento que ha sufrido el terreno después de haberse suscitado el siniestro en el mes de febrero 2021. Durante las visitas técnicas se procedió a determinar la dirección de las grietas obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 29

Dirección y Ubicación de Grietas

Grieta N°	Coordenadas UTM			Rumbo	Buzamiento	Abertura
	Este	Norte	Elevación			
1	730207,3	9747148,8	2008 m	19° N	279° O	8,0 cm
2	730269	9747056,5	2020 m	17° N	287° O	12,0 cm
3	730394	9748008,7	2162 m	3° N	190° S	0,5 cm
4	730332,3	9748070,3	2128 m	5° N	190° S	2,0 cm

Figura 18*Grietas Cercanas a las Piscinas de Oxidación*

Nota. La imagen de la izquierda muestra una de las grietas al pie de la piscina de oxidación principal, en la imagen central y en la de la derecha se observa las aberturas que presentan las grietas que están cerca a las piscinas de oxidación principal y secundaria, respectivamente.

Figura 19*Fisuras en Propiedad Sr. Idrovo*

Nota. La imagen de la izquierda presenta una de las fisuras que se ubican dentro de la propiedad del Sr. Idrovo, esta fue seleccionada para medir su dirección. La imagen de la izquierda contiene la fisura que se encuentra en la entrada de la misma propiedad.

Clima e Hidrología

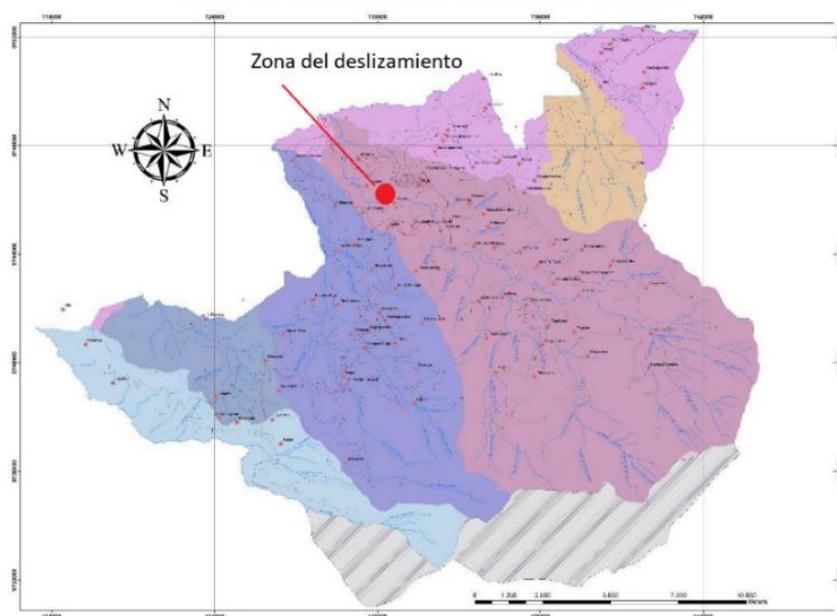
La precipitación del cantón Chunchi tiene dos tendencias definidas. Entre los meses de enero a abril las lluvias son más abundantes, específicamente en abril se presentan los valores más altos de precipitación media mensual con 100 mm, mientras que de junio a noviembre con presencia de menos precipitación. Teniendo una precipitación media anual de 696 mm.

La intensidad de las precipitaciones para Chunchi tiene un valor considerable a tomar en cuenta debido que para periodos de retorno de 25 hasta 100 años la intensidad escala a valores de 2.52 hasta mayores a 3. La temperatura media anual es de 14.5 °C. La humedad relativa existente en la zona es de 88% anual. (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Chunchi, s.f.)

La cantidad de precipitación y la intensidad de esta representa un peligro constante en la estabilidad del terreno, especialmente en los primeros meses del año donde se presenta en mayor medida. Los factores del clima, esencialmente la precipitación tiene un papel muy importante de la estabilidad de un talud, ya que son determinantes en procesos como la meteorización física y química.

Las lluvias intensas infiltran agua en el macizo rocoso, lo cual genera una carga hidrostática incrementando la presión de poros. Posterior a esto se generan cargas hidrodinámicas como parte de la acción del agua en el macizo rocoso. Todo esto puede ser un elemento detonante de un deslizamiento.

Microcuena. Dentro de la superficie del cantón Chunchi se presentan 10 microcuencas que forman parte del recurso hídrico de la zona. Específicamente la zona del deslizamiento se encuentra dentro de la microcuena río Picay con un área de influencia de 11622 ha. Esta la más grande del cantón, tiene un índice de compacidad entre 1,25 -1,50 por lo que su tendencia a crecidas es media.

Figura 20*Microcuencas del Cantón Chunchi*

Nota. Modificado de (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Chunchi, s.f.)

Por el uso del agua de la zona y las características morfológicas de la microcuenca se evidenció la presencia de ramales con caudales de 1 a 2.5 lt/s en toda la superficie que corresponde al deslizamiento, los cuales son alimentados mediante el agua superficie y subterránea que se emplea en el lugar. Al no tener una conducción específica hacia el río principal toda esta agua se infiltra en el terreno saturándolo.

Hidrogeología

La presencia de gran cantidad de agua subterránea se evidencia en los ojos de agua que se encontraron en la zona durante las visitas técnicas que se realizaron en el desarrollo del presente trabajo, a continuación, se detalla la ubicación de estos afloramientos de agua:

Tabla 30*Ubicación de Afloramientos de Agua*

Ojo de Agua N°	Coordenadas UTM		
	Este	Norte	Elevación
1	729803,18	9746919,14	1888,59
2	729789,78	9746925,53	1890,40
3	729784,08	9746928,55	1889,78
4	729769,09	9746932,05	1889,40
5	729746,97	9746933,29	1885,67
6	729455,90	9746966,57	1850,81
7	729233,37	9746892,21	1793,77
8	729143,88	9746907,21	1790,97

Para establecer el nivel freático se parte de la ubicación de los ojos de agua encontrados en la zona de estudio. En el pie del talud, la cota del nivel freático se establece con referencia al río Picay, ascendiendo superficialmente por la masa de movimiento y pasa por los afloramientos que indican la presencia de agua y la dirección de la línea piezométrica.

En la zona del deslizamiento también se distinguen quebradas de hasta 17 metros de profundidad, en donde los flujos de agua tienen un caudal aproximado de 1 l/s a 2,5 l/s.

Cabe destacar que el cantón Chunchi posee 336 vertientes para uso agrícola y pecuario, esto se da debido a que la geomorfología permite la salida de agua subterránea, dando lugar a que exista infiltración y descargas inmediatas.

Las vertientes superiores recargan los acuíferos por medio de infiltración que se genera en las actividades de riego y se descargan en la parte inferior, a este proceso de recarga y descarga se le atribuye la saturación de los suelos. Además, las vertientes se encargan de erosionar los taludes hasta desestabilizarlos.

Se considera que las lluvias intensas que se produjeron en el temporal en el que se suscitó el siniestro, aportaron en la infiltración del suelo, incrementando la presión de los poros que se desenlaza en la ocurrencia de un deslizamiento.

Vegetación

La cobertura natural que caracteriza a la zona del deslizamiento está constituida por vegetación herbácea nativa con un crecimiento espontáneo, utilizado con fines de pastoreo en la crianza de ganado. (Instituto Espacial Ecuatoriano & MAGAP, 2013)

La vegetación se desarrolla en los abruptos de la zona y es incapaz de sostener al suelo debido a que no posee raíces profundas que aporten estabilidad al terreno y eviten además problemas de erosión, reptación y fallas superficiales.

Figura 21

Vegetación Característica de la Zona



Otro factor a considerar en el análisis es la deforestación irracional que ha sufrido la zona, puesto que a esta acción se le atribuye la supresión de la gran vía natural de drenaje que tenía el talud, esto genera aumento de la presión de los poros en el suelo y como consecuente aumenta el nivel freático que produce problemas de estabilidad. (Inostroza et al., 2017)

Efecto Antrópico

Se considera una de las principales causas de inestabilidad a la infiltración antrópica generada por el mal uso del agua de riego y sobre todo por el método preponderante de riego que se usa en la zona, este es por gravedad, característico por saturar permanentemente al

suelo desestabilizando las laderas y dando lugar a la formación de planos de falla que se desenlazan en la ocurrencia de siniestros de esta magnitud.

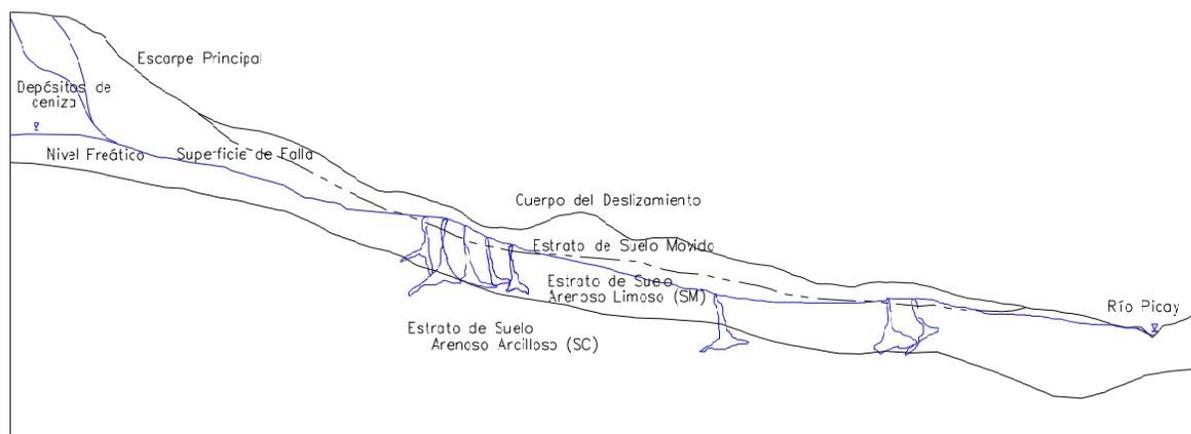
Se evidencia que los canales encargados de conducir el agua para riego de potreros no son revestidos, siendo una causa más para que las capas profundas del suelo se encuentren altamente saturadas.

Otro factor que incluye al recurso hídrico como detonante es el anti técnico manejo de las descargas de aguas residuales, este proceso de vertido se lo realiza directamente en la zona del deslizamiento aportando a la saturación y contaminación del suelo. Esta actividad se evidencia en las imágenes que muestran como las tuberías desfogon su contenido en el suelo sin ningún tipo de control sanitario. (Jarrín, 2021)

Representación Gráfica del Modelo Conceptual

Figura 22

Modelo Conceptual Adoptado



Modelación Matemática Usando Software

Los parámetros del suelo (peso específico, cohesión y ángulo de fricción) considerados en el análisis de estabilidad de los tres perfiles de interés se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 31

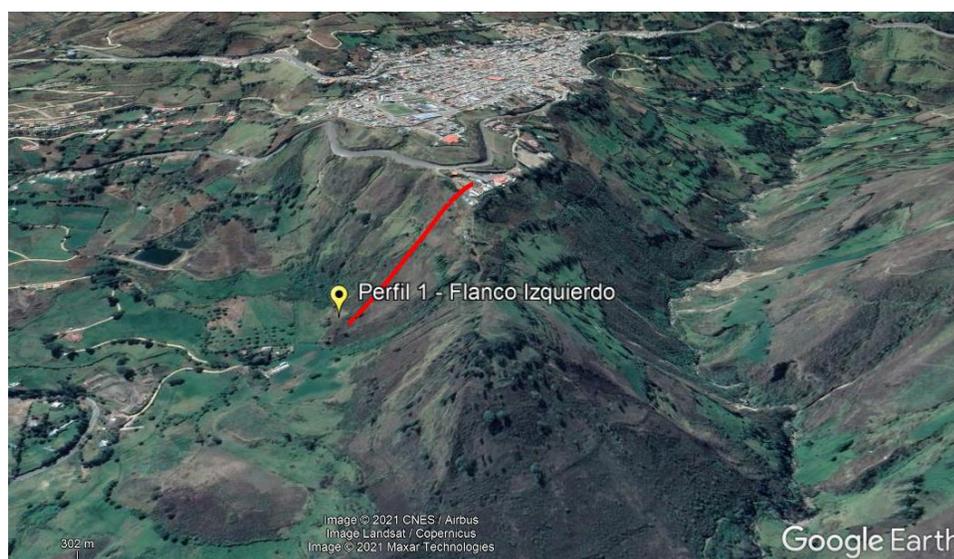
Parámetros del Suelo Perfil 1, Perfil 2 y Perfil 3

Material	γ (gr/cm ³)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Arena Limosa	2,611	0,37	22,04
Arena Arcillosa	2,413	0,94	26,52

Perfil 1: Referente al Flanco Izquierdo

Figura 23

Ubicación de Análisis - Perfil 1



Nota. Modificado de (Google Earth, 2020)

Tabla 32

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 1 Método de Janbú

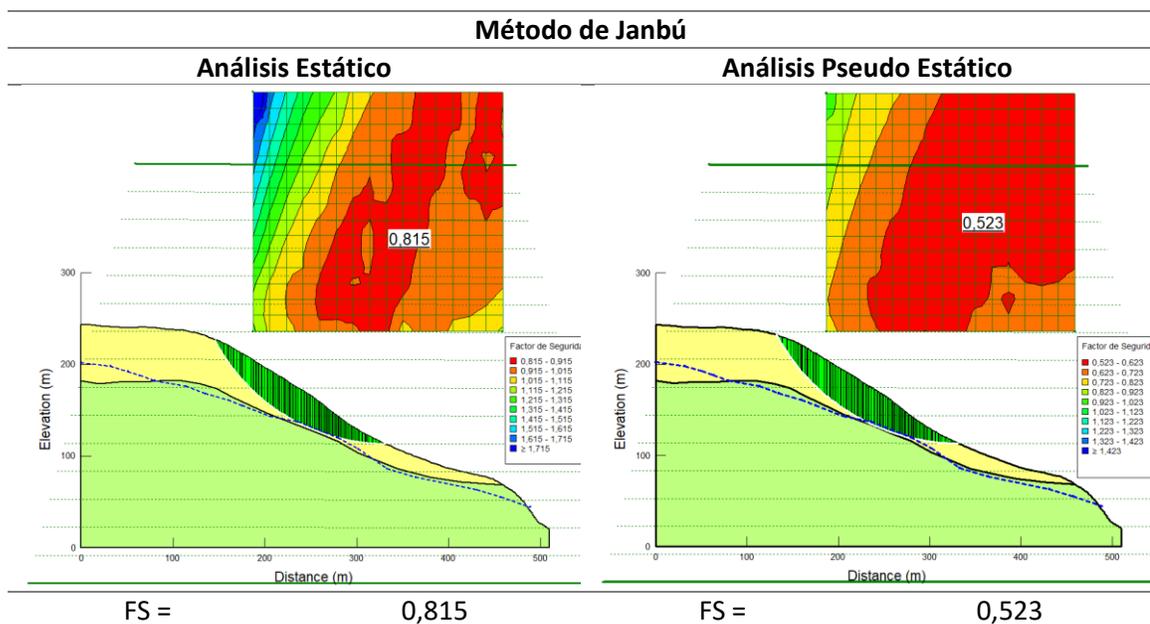


Tabla 33

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 1 Método de Spencer

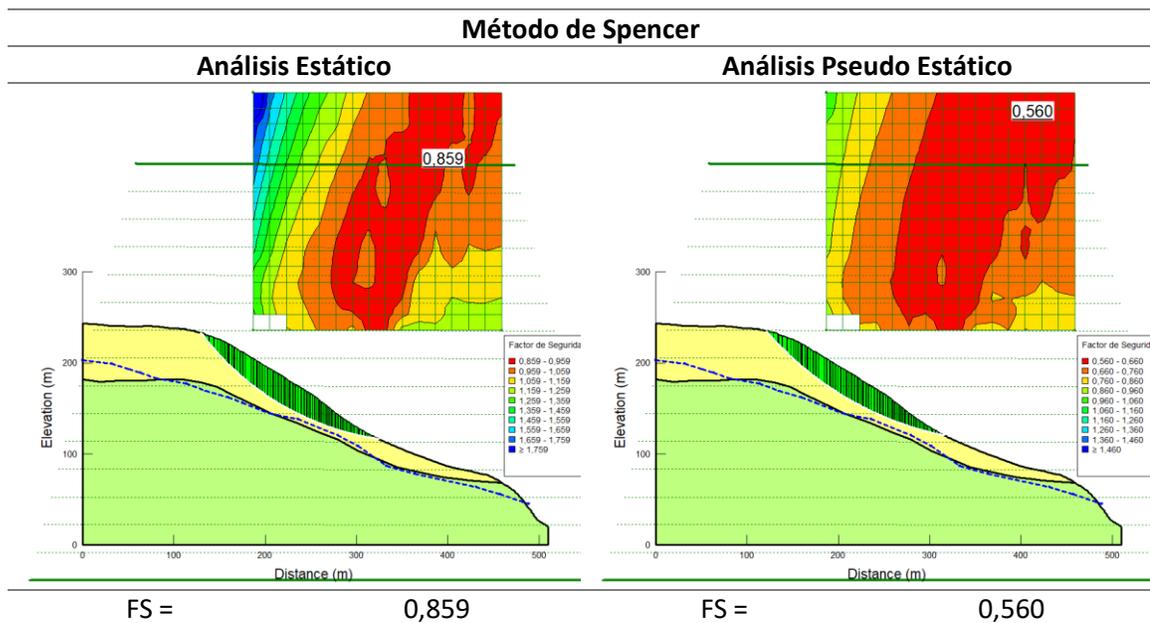
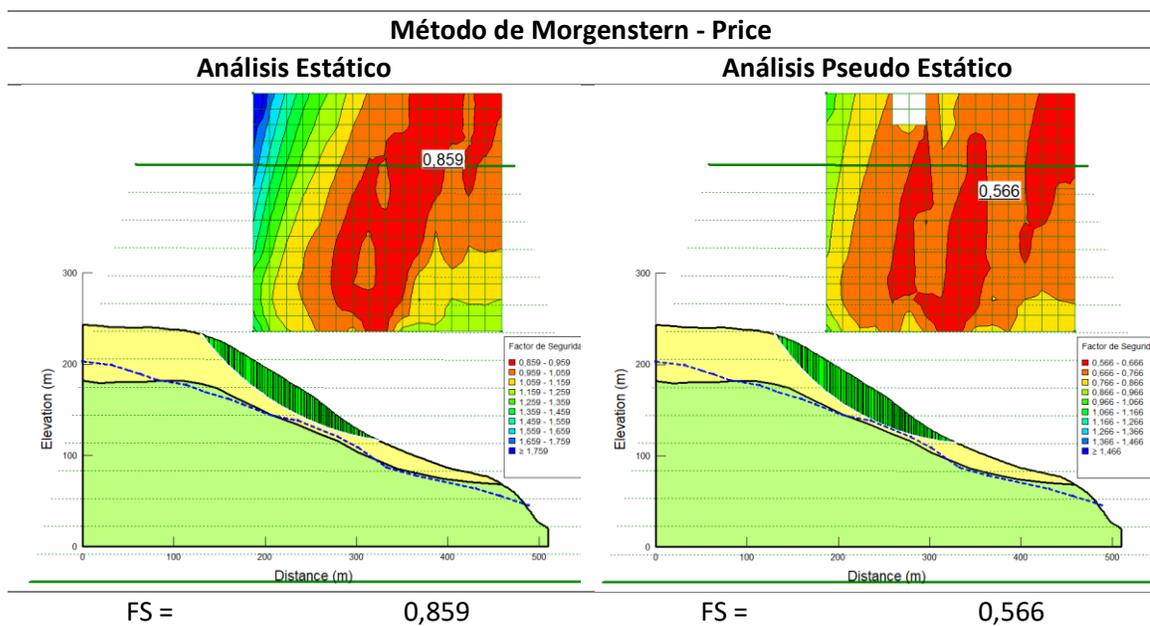


Tabla 34

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 1 Método de Morgenstern - Price



Perfil 2: Referente a las Piscinas de Oxidación

Figura 24

Ubicación de Análisis - Perfil 2



Nota. Modificado de (Google Earth, 2020)

Tabla 35

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 2 Método de Janbú

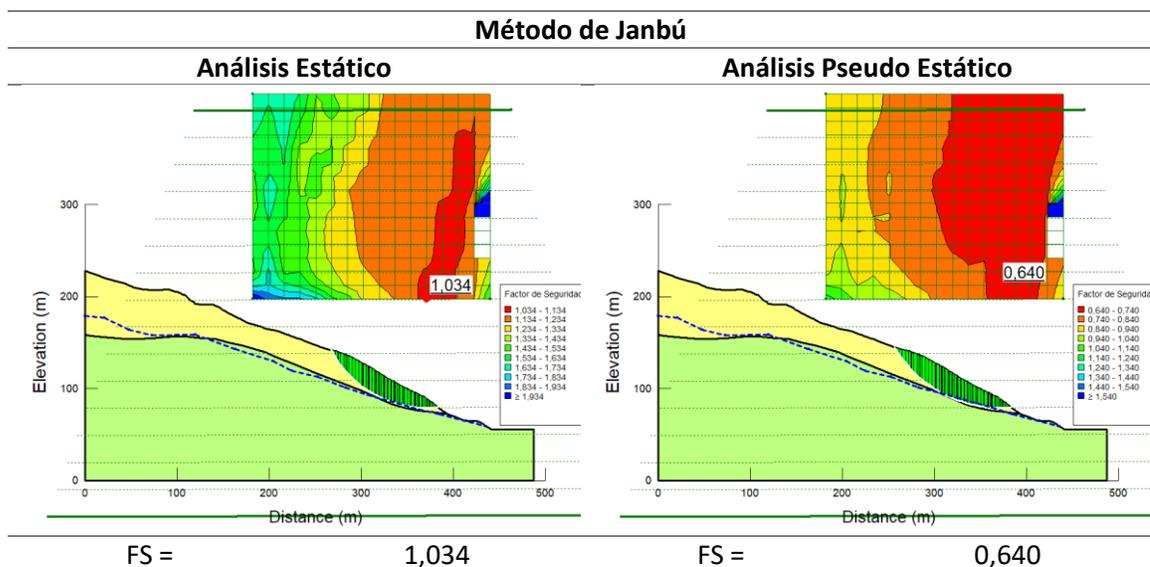


Tabla 36

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 2 Método de Spencer

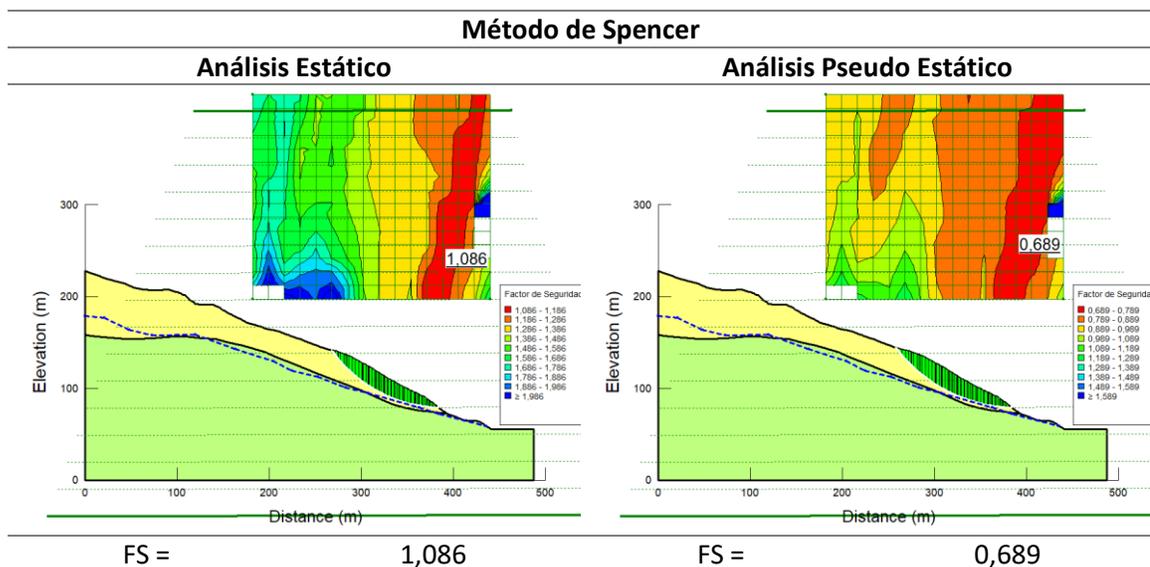
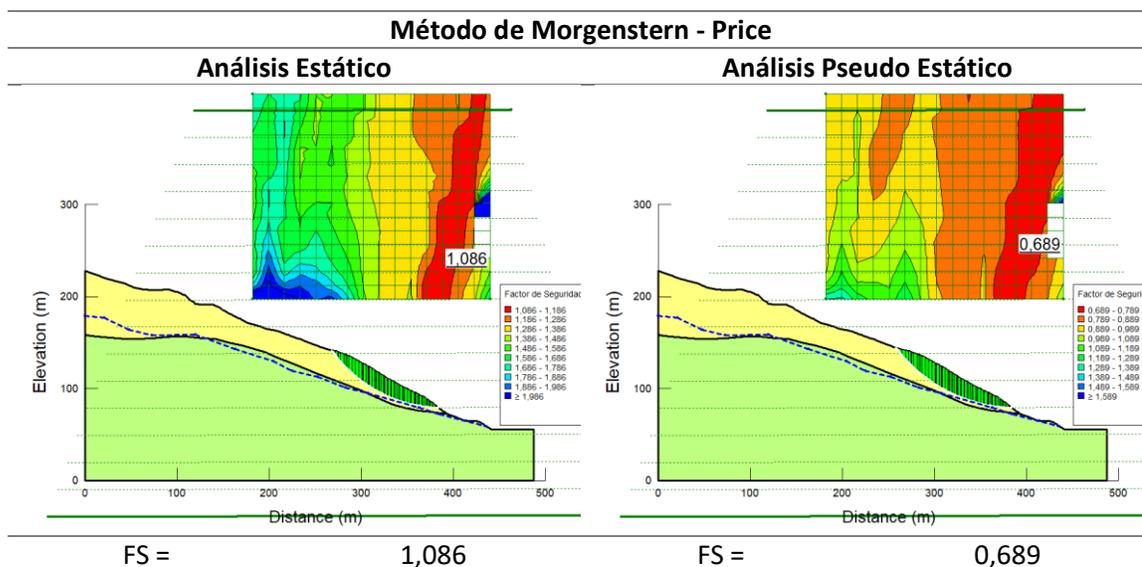


Tabla 37

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 2 Método de Morgenstern - Price



Perfil 3: Referente a Viviendas Vulnerables

Figura 25

Ubicación de Análisis - Perfil 3



Nota. Modificado de (Google Earth, 2020)

Tabla 38

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 3 Método de Janbú

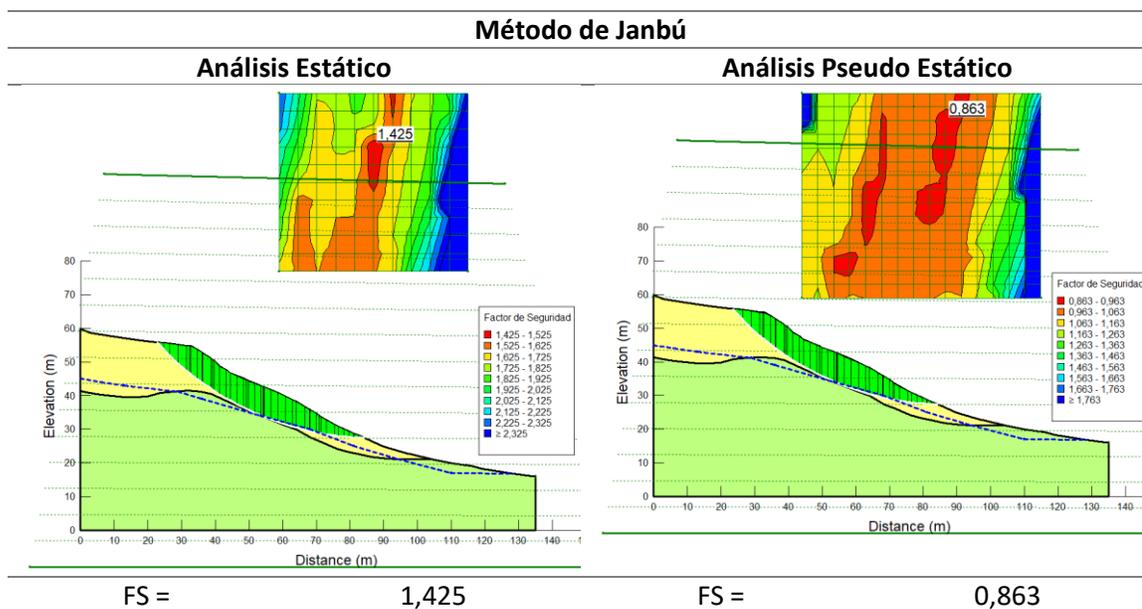


Tabla 39

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 3 Método de Spencer

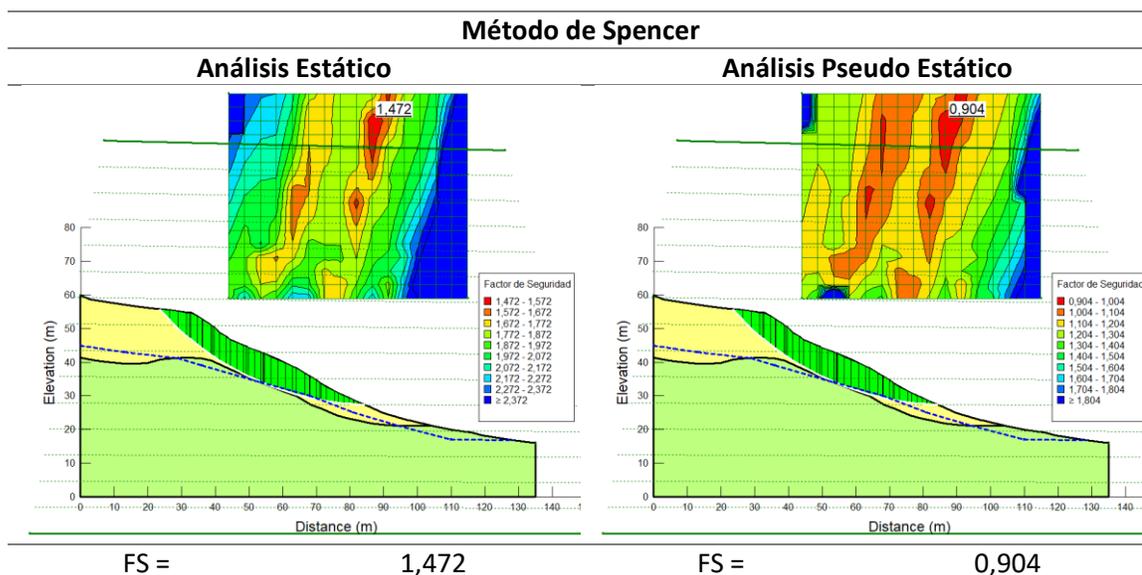
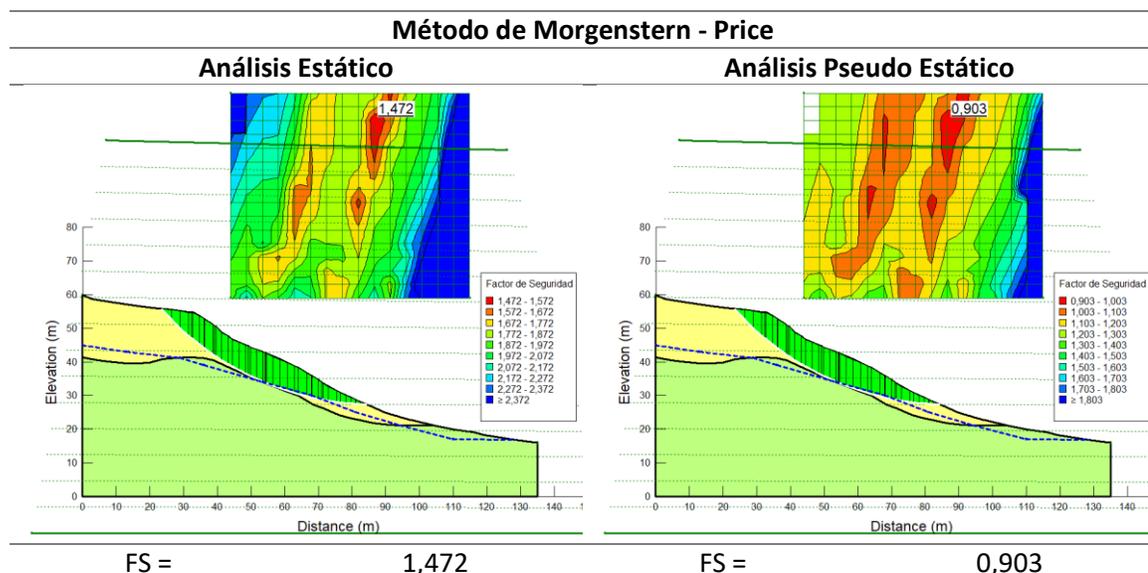


Tabla 40

Resultados Análisis de Estabilidad Perfil 3 Método de Morgenstern - Price



Tabulación y Análisis de Resultados

Tabla 41

Factores de Seguridad FS Obtenidos en el Análisis de Estabilidad

Perfil	Referencia	Análisis	Método de Análisis			Condición
			Janbú	Spencer	Morgenstern - Price	
Perfil 1	Flanco	Estático	0,815	0,859	0,859	Inestable
	Izquierdo	Sísmico	0,523	0,560	0,566	Inestable
Perfil 2	Piscinas de	Estático	1,034	1,086	1,086	Estable
	Oxidación	Sísmico	0,640	0,689	0,689	Inestable
Perfil 3	Viviendas	Estático	1,425	1,472	1,472	Estable
	Vulnerables	Sísmico	0,863	0,904	0,903	Inestable

La Tabla 41 muestra los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad de los tres taludes ubicados en las zonas de interés, estos se basan en las hipótesis de los modelos de Janbú, Spencer y Morgenstern – Price. Se puede observar que el modelo de Janbú proporciona

los menores valores de FS por las simplificaciones que el método realiza, mientras que los dos restantes no presentan una gran variación entre sus resultados.

Se destaca que, en todos los casos analizados bajo condiciones sísmicas, que toma en cuenta al coeficiente de aceleración sísmico en el cantón Chunchi, los taludes resultaron ser inestables por presentar un valor de FS menor a la unidad.

En el análisis estático, el perfil 2 que se encuentra en referencia a las piscinas de oxidación y el perfil 3 que está sobre las viviendas vulnerables, se observa que los taludes presentan un valor de FS mayor a 1, reflejando la estabilidad que tienen bajo las condiciones de cálculo establecidas. Este resultado se le puede atribuir a la disminución de pendiente que existe en estas zonas específicas de análisis, cosa que no sucede en el perfil 1 ya que debido a su geometría y abrupta pendiente no logra alcanzar un FS que supere a la unidad.

Análisis Regresivo de Estabilidad de Taludes

Condiciones Iniciales

Figura 26

Ubicación del Análisis en Regresión de FS



Nota. Modificado de (Google Earth, 2020)

Tabla 42

Parámetros del Suelo - Condiciones Iniciales

Material	γ (gr/cm³)	c (kg/cm²)	ϕ (°)
Suelo Movido	2,685	0,24	15,88
Arena Limosa	2,611	0,37	22,04
Arena Arcillosa	2,413	0,94	26,52

El perfil para el cálculo se compone de tres capas, al ubicarse en la zona del cuerpo del deslizamiento la primera capa se trata de toda la masa de suelo desplazada, como segundo estrato se tiene las arenas limosas, seguidas con la capa de arenas arcillosas.

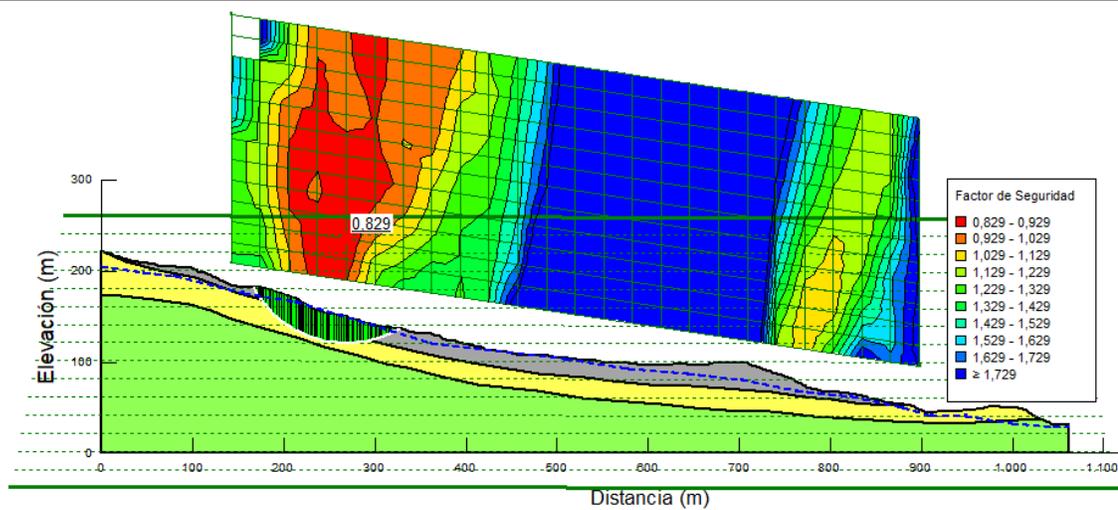
Para la primera capa se emplean valores de resistencia al corte residual al tratarse de la masa de suelo donde ya ha ocurrido la falla, los cuales tienen un valor más bajo que la resistencia pico.

Tabla 43

Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Janbú

Método de Janbú

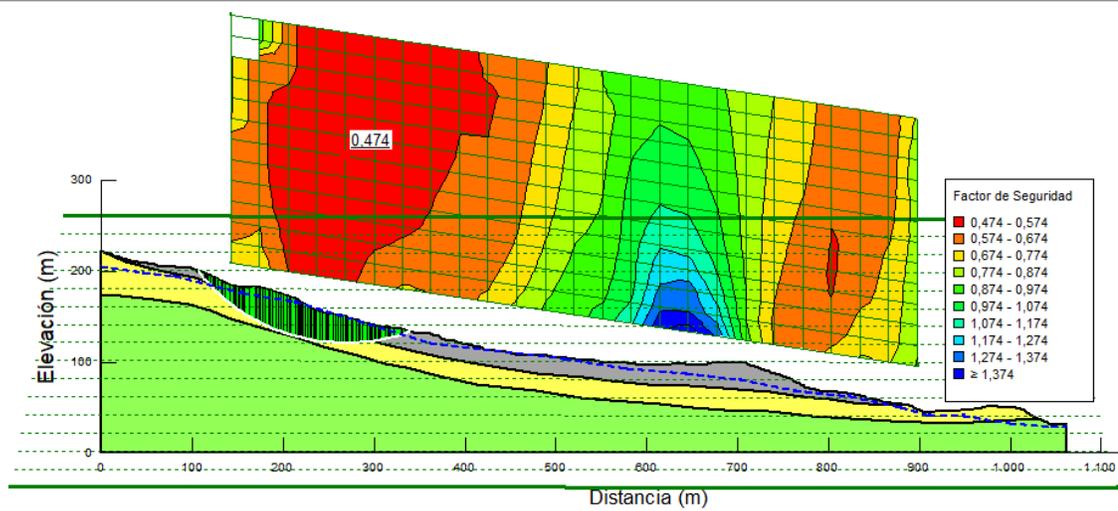
Análisis Estático



FS =

0,829

Análisis Pseudo Estático



FS =

0,474

Tabla 44

Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Spencer

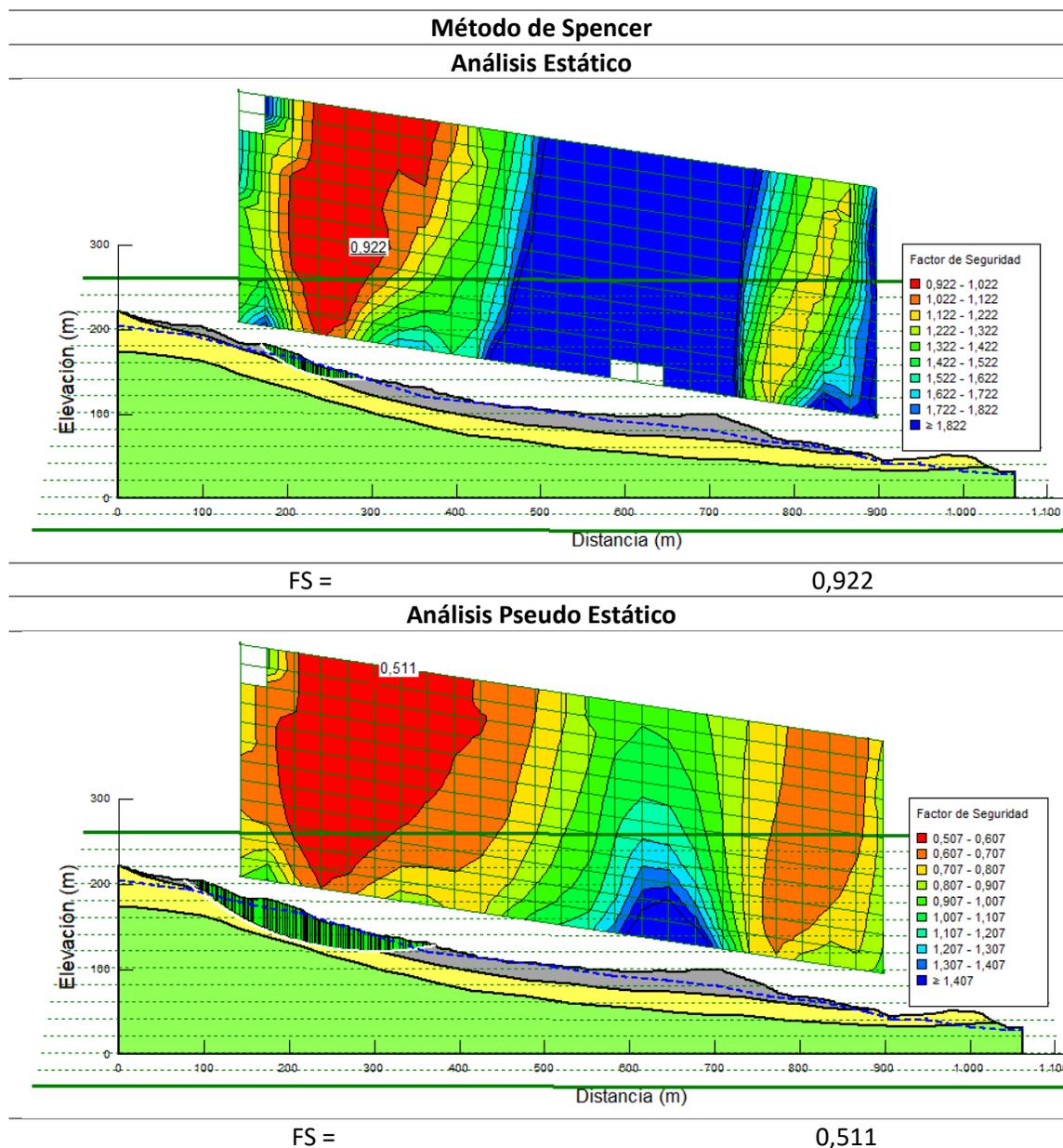
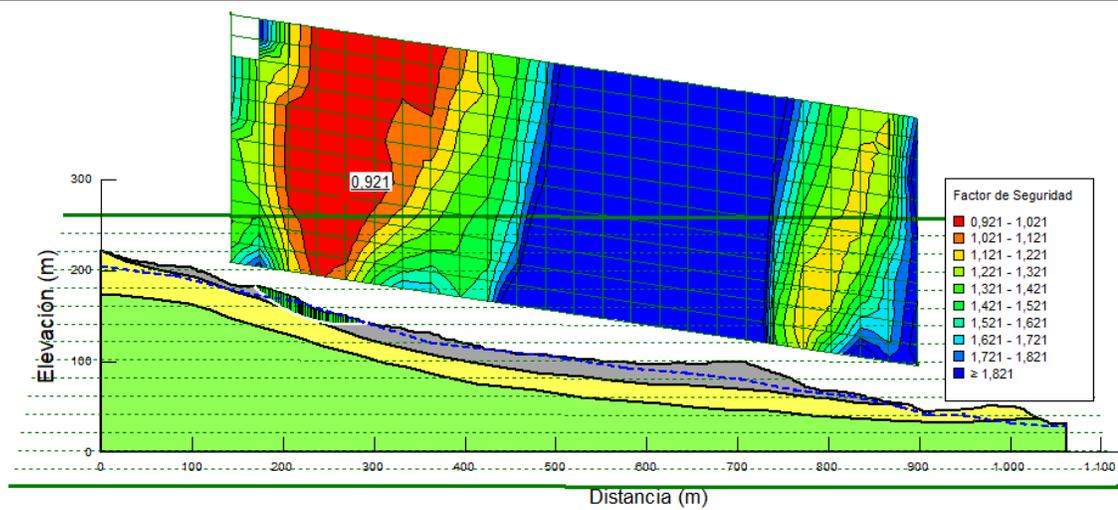


Tabla 45

Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Morgenstern – Price

Método de Morgenstern - Price

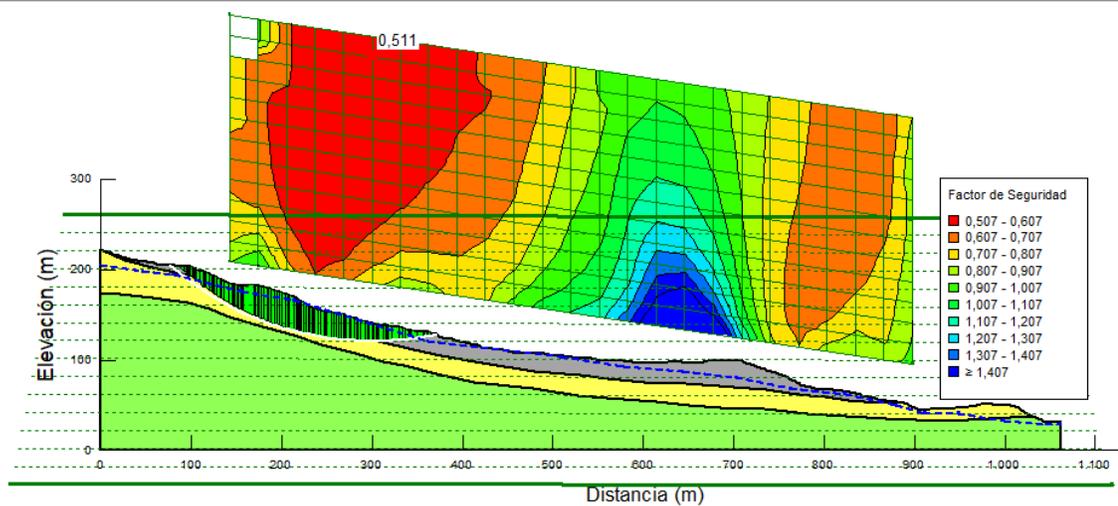
Análisis Estático



FS =

0,921

Análisis Pseudo Estático



FS =

0,511

Condiciones Finales

Tabla 46

Parámetros del Suelo Resultantes del Análisis Regresivo de FS

Material	γ (gr/cm ³)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Suelo Movido	2,685	0,25	25
Arena Limosa	2,611	0,37	22,04
Arena Arcillosa	2,413	0,94	26,52

Tabla 47

Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Janbú

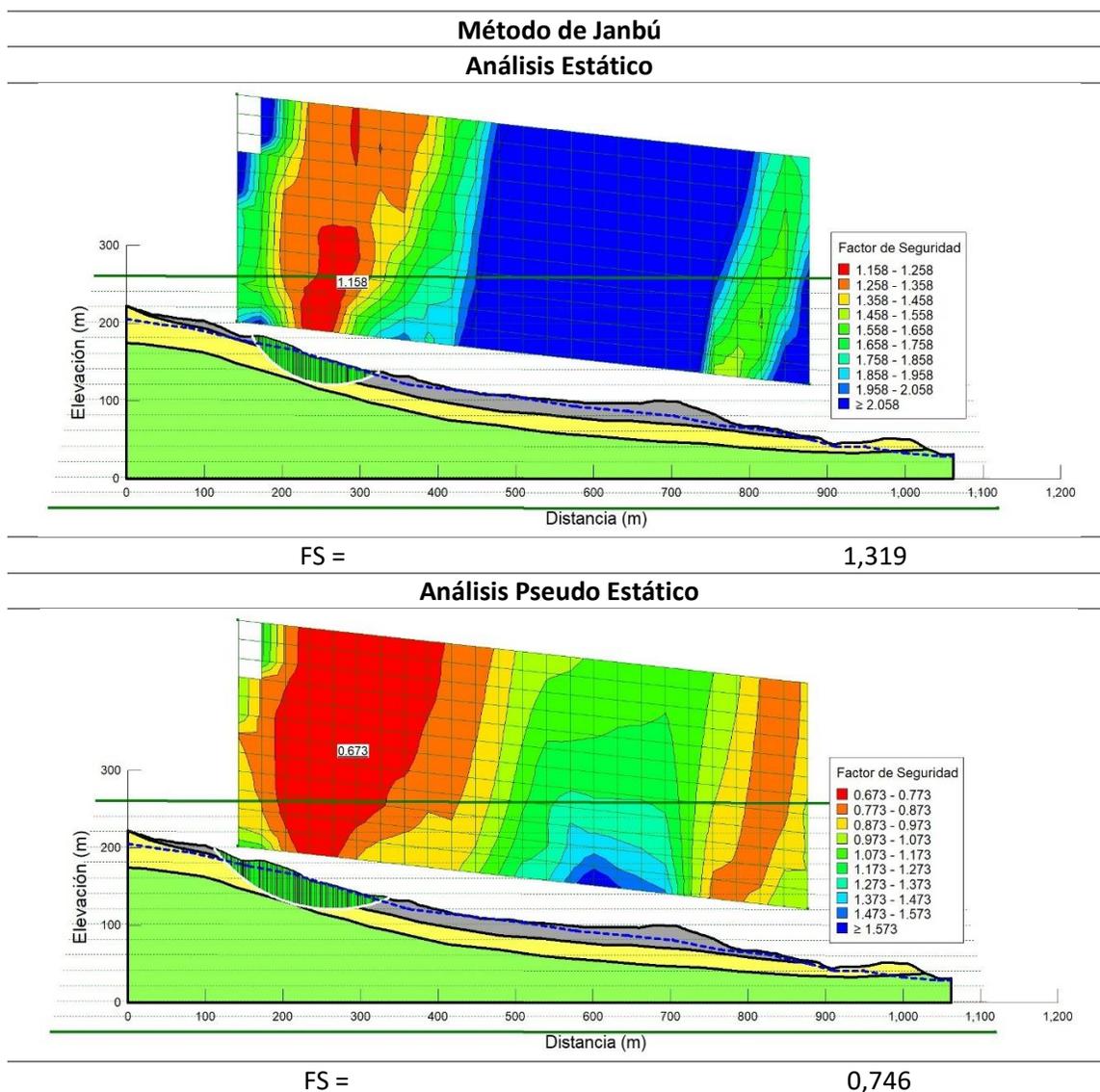
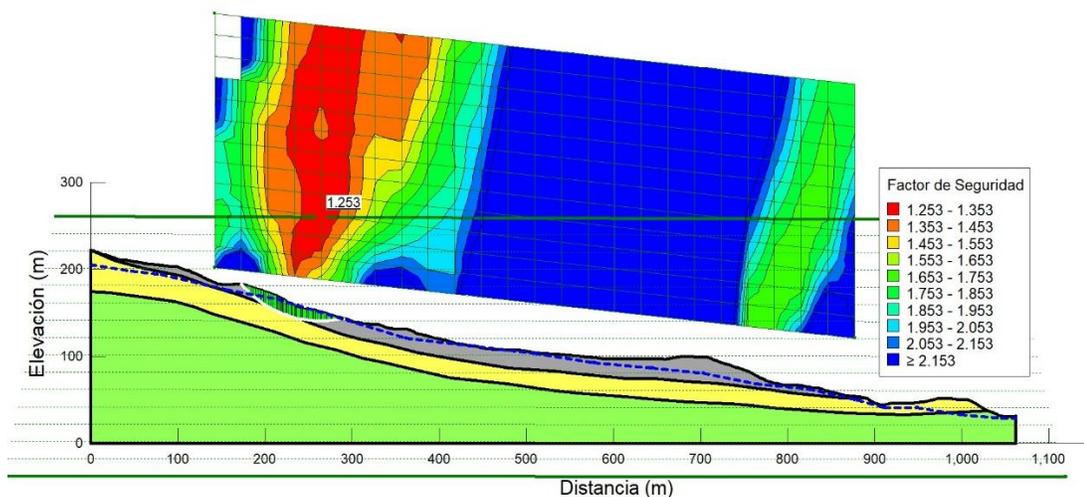


Tabla 48

Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Spencer

Método de Spencer

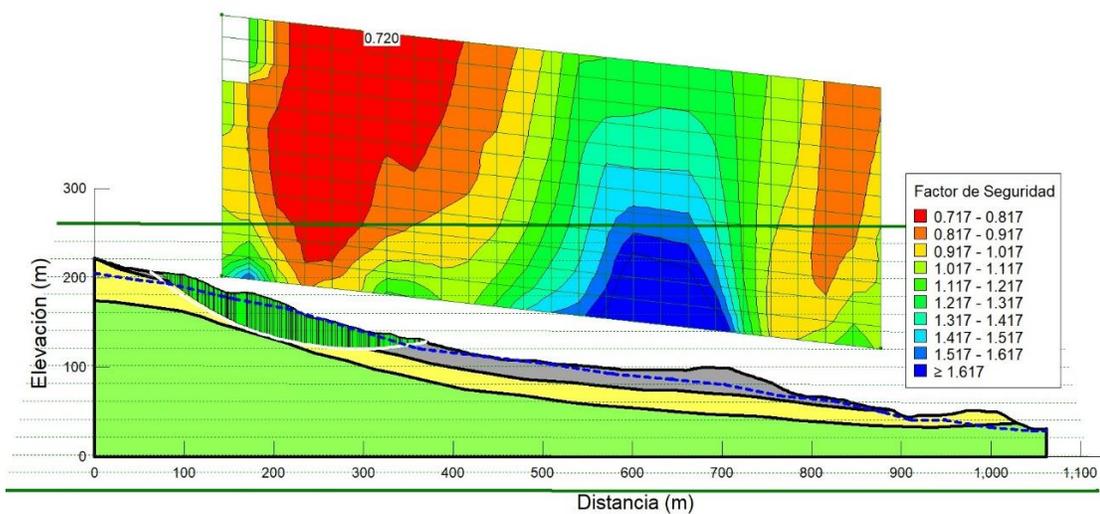
Análisis Estático



FS =

1,458

Análisis Pseudo Estático



FS =

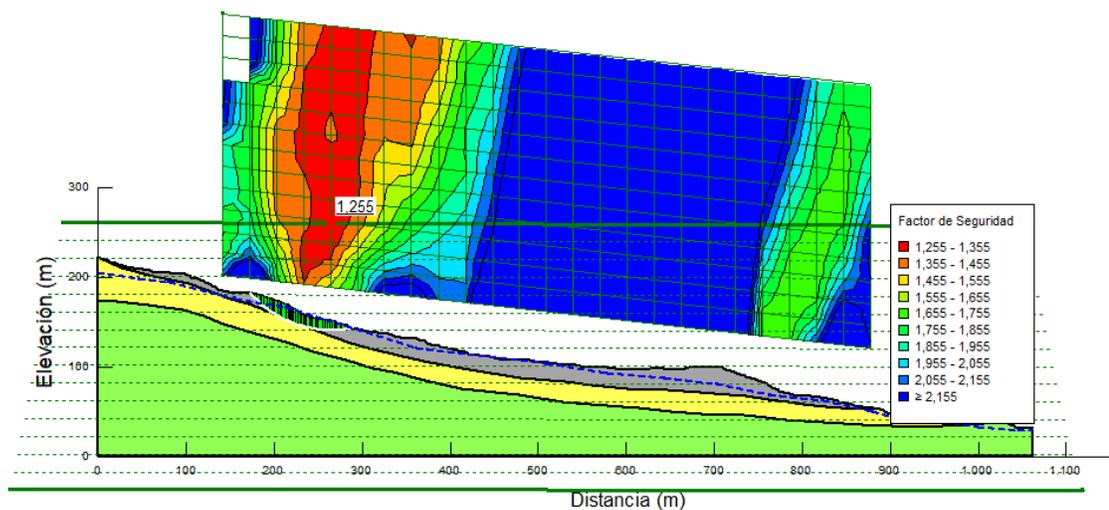
0,830

Tabla 49

Resultados de Análisis de Estabilidad Método de Morgenstern - Price

Método de Morgenstern - Price

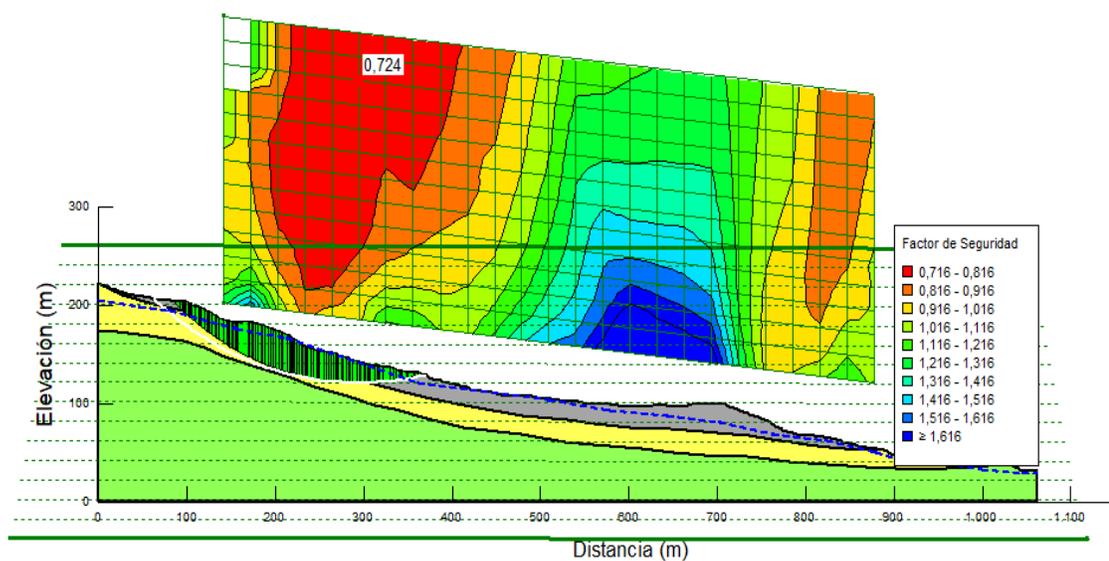
Análisis Estático



FS =

1,255

Análisis Pseudo Estático



FS =

0,724

Tabulación y Análisis de Resultados

Tabla 50

Factores de Seguridad FS Obtenidos en el Análisis Original y en el Regresivo

Condición	Análisis	Método de Análisis		
		Janbú	Spencer	Morgenstern - Price
Original	Estático	0,829	0,922	0,921
	Sísmico	0,474	0,511	0,511
Regresivo	Estático	1,158	1,253	1,255
	Sísmico	0,673	0,717	0,724

Se realizó el análisis en un estado inicial, con los parámetros mecánicos que muestra la tabla 42 y se hallaron los factores de seguridad para la zona de estudio teniendo en cuenta dos estados y tres métodos de análisis, donde el método de Janbú presenta los valores más bajos para cada análisis mientras que los métodos más precisos como el Morgenstern y Spencer presentan valores un poco mayores pero similares entre sí.

Estado estático saturado: En este caso se encuentra un nivel freático alto, debido a la presencia de agua en zonas superficiales del terreno. Los resultados muestran condiciones de inestabilidad para los tres métodos, con valores menores a 1. Estado pseudo estático saturado: Se trata de la condición más crítica de análisis, cuando la zona de estudio tiene un nivel freático alto y se encuentra bajo condición sísmica. Los resultados muestran condiciones de inestabilidad crítica para los tres métodos.

Aumentando los valores de resistencia al corte en capa de material perturbado como lo muestra la tabla 46, se realizó el mismo análisis con los mismo estados y métodos, con lo que obtuvo los factores de seguridad para la condición final. Estado estático saturado: Los resultados presentan valores mayores a 1 lo que representa estabilidad con las condiciones dadas. Estado pseudo estático saturado: Los resultados muestran condiciones de inestabilidad para los tres métodos en caso de un eventual sismo con valores menores a 1.

Capítulo V

Discusión

Los mecanismos de falla evaluados indican que el sistema es inestable por la topografía abrupta y la incidencia del recurso agua. Por medio de infiltración, en donde las arenas limosas y arenas arcillosas capturan y drenan el agua, se recargan los acuíferos desde las vertientes superiores y se descargan en la parte inferior, proceso que favorece a la saturación y aumento de presión de poros. A la infiltración se suman las abundantes precipitaciones que se dan entre los meses de enero a abril, que además de incrementar la presión de poros, actúa de forma determinante en los procesos de meteorización que reducen la resistencia de los materiales.

Por las características de la vegetación y los procesos de deforestación que existen, el sistema no posee una vía natural para drenar el agua y generar condiciones de estabilidad. El riego por gravedad es otro factor antrópico que desestabiliza el suelo por la permanente saturación que lo caracteriza.

En síntesis, las vertientes que se encuentran en la parte alta recargan los acuíferos que se descargan en la parte inferior, a este proceso de recarga y descarga se le atribuye la saturación del suelo, que como consecuente incrementa la presión de los poros y disminuye la resistencia al corte convirtiéndose en factores desencadenantes en la ocurrencia del deslizamiento.

Los factores de seguridad obtenidos en el análisis de estabilidad indican que el talud más crítico se encuentra el flanco izquierdo del deslizamiento, debido a condiciones como la cercanía a los escarpes principales y su pendiente pronunciada. Los taludes de la piscina de oxidación y las viviendas vulnerables en el estado estático presentan valores mayores a 1 debido a que su pendiente es menor y la composición de sus materiales con mayor plasticidad, por ende, resistencia.

El análisis en cuestión se realiza considerando las condiciones actuales de los taludes, entonces, debido a que los perfiles de análisis se encuentran en la parte superior del deslizamiento y que el cantón se encuentra en el periodo con menor precipitación del año, la influencia del nivel freático no es un parámetro representativo para considerar, pero es un factor muy importante en la estabilidad en tiempos donde la precipitación aumenta y satura los estratos de suelo.

En el análisis pseudo estático se obtuvieron valores menores a 1, esta condición se debe tomar muy en cuenta puesto que Chunchi se encuentra en la zona IV de zonificación sísmica con una caracterización de peligro alta, indicando el riesgo potencial de la zona de estudio.

Con el análisis regresivo de factores de seguridad se buscó establecer parámetros de resistencia al corte de la capa movida con lo cuáles obtener estabilidad del sitio. Por su ubicación tan superficial, el nivel freático juega un papel muy importante alterando directamente la resistencia del material del talud y disminuyendo la estabilidad del terreno.

Con respecto del análisis en regresión en donde se buscó alcanzar un factor de seguridad mayor a la unidad, para esto se requiere parámetros mecánicos de 25° para el ángulo de fricción interna y 0.2 kg/cm^2 para la cohesión en la primera capa. Y estas son las características que debería tener la superficie del deslizamiento para considerarse como una zona estable.

Conclusiones

- En base a la investigación de laboratorio, se generaliza que la zona de estudio está compuesta por Arenas Limosas y Arenas Arcillosas de clasificación SUCS SM y SC respectivamente. La gravedad específica de los materiales se encuentra en un rango de (2,4 a 2,7) y los parámetros de resistencia al corte pico y residual que se presentaron en la sección de resultados no difieren de forma representativa por tratarse de suelos residuales.
- Del análisis de los mecanismos de falla actuantes en el modelo conceptual, se concluye que los factores condicionantes y desencadenantes en la ocurrencia del deslizamiento son el incremento de la presión de poros y la disminución de la resistencia al corte de los materiales producto de la saturación y meteorización del suelo.
- Los valores más bajos de FS se obtienen con el modelo de Janbú, esto se debe a las simplificaciones de análisis que este método realiza. Con los otros dos métodos se obtiene valores mayores debido a que realizan un análisis riguroso de equilibrio total. Sin embargo, la variación entre los tres no resulta significativa.
- En base a la teoría de equilibrio limite se establecieron las condiciones de estabilidad de los taludes. El primero y más crítico se establece como inestable con valores de F.S menores a 1. El segundo en condición de punto de rotura. Y el tercero como zona estable con las condiciones de análisis establecidas.
- En el análisis pseudo estático se obtuvieron valores menores a 1 para los tres sitios, estableciendo a las tres zonas como inestables. Esta condición se debe tomar muy en cuenta puesto que Chunchi se encuentra en la zona IV de zonificación sísmica con una caracterización de peligro alta, indicando el riesgo potencial de la zona de estudio.

- Del análisis regresivo de los factores de seguridad de la zona deslizada se concluye que los valores para que zona sea considerada como estable mediante la teoría del equilibrio límite son 25° y 0.25 kg/cm^2 para cohesión.
- Es imprescindible que pobladores y autoridades estén conscientes que están ubicados en una zona sísmica de peligrosidad alta, y que, ante cualquier vibración de la superficie, los taludes se encontrarían en potencial condición de inestabilidad como se evidencia en los resultados del análisis pseudo estático realizado.

Recomendaciones

- Realizar perforaciones para adquirir características de los suelos y aumentar el grado de confiabilidad geotécnica.
- El manejo de las muestras que serán ensayadas en laboratorio debe cumplir con los protocolos establecidos por normativa para conservar sus características naturales y garantizar resultados confiables, especialmente en los parámetros de resistencia al corte que son los encargados de determinar el comportamiento del suelo.
- Realizar un modelo del agua subterránea y análisis completo de los acuíferos.
- Los métodos de equilibrio límite son los más utilizados en el medio, sin embargo, se recomienda realizar análisis de estabilidad en distintas secciones longitudinales mediante métodos numéricos que entreguen resultados mucho más precisos en referencia a la estabilidad global del talud.
- Efectuar un análisis de riesgo de pérdidas de vidas humanas y pérdidas económicas para establecer un factor de seguridad que considere el hábitat que se desarrolla en torno al talud en cumplimiento a los requerimientos mínimos que establece la normativa ecuatoriana.

Referencias

- Acevedo, P., Karzulovic, A., & Molina, J. (1981). Análisis regresivo de estabilidad de taludes. *Revista IDIEM*, 20(2), 59–70.
- Aguilar, O., & Zúniga, C. (2015). *Análisis Comparativo De Estabilidad De Taludes Mediante Los Métodos De Equilibrio Límite Aplicado A Taludes O Laderas Aledañas Al Cerro De La Popa, Casco Urbano De Cartagena*. [Universidad de Cartagena].
<https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/2089/TRABAJO-DE-GRADO-FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alcántara, L. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 1(41).
<https://doi.org/10.14350/rig.59101>
- Altamirano, C., & Rivas, J. (2015). *Universidad Ricardo Palma Facultad De Ingeniería*. Universidad Ricardo Palma.
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos. *Universidad Nacional de Rosario*, 39.
- ASTM Standard D1557. (2003). Test methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. *ASTM International*, 3, 10.
- ASTM Standard D2216. (1998). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *ASTM International, January*, 1–5.
www.astm.org
- ASTM Standard D2434. (2000). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant head). *ASTM International*, 68(Reapproved), 5.
- ASTM Standard D2487. (2000). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*, 04, 1–12.

- ASTM Standard D2850. (2003). Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. *ASTM International, December*, 6.
- ASTM Standard D3080. (2003). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International, 04*, 1–7.
- ASTM Standard D422. (2002). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *ASTM International, D422-63*, 1–8. [papers2://publication/uuid/32E2AE22-8555-4A27-B8B6-F7217202A1F2](https://publication/uuid/32E2AE22-8555-4A27-B8B6-F7217202A1F2)
- ASTM Standard D4318. (2000). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International, 04*, 1–14.
- ASTM Standard D854. (2001). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *ASTM International, 83(Reapproved)*, 1–7.
- Avila, J. (2008). *Metodología - Estabilidad de Taludes*.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/05.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Bajracharya, S. R. (2006). An approach to the classification of slope movements. "*Earthquake Vulnerability and Multi-Hazard Risk Assessment: Geospatial Tools for Rehabilitation and Reconstruction Effort*, 33.
- Beltrán, J., & Díaz, D. (2018). Análisis de la capacidad de carga admisible de los suelos de cimentación del complejo arqueológico Chan Chan debido al ascenso del nivel freático. In *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*.
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/625746>
- Borcelli, L. (2019). Clasificación ingenieril de los suelos y de los macizos rocosos. In *Geotecnia I* (Issue 1).
- Botía, W. (2015). *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE SUELOS Y MEMORIA DE*

CÁLCULO (Issue March) [UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA].

[https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6239/MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE SUELOS.pdf;jsessionid=5ABD5876EC2A7FCF8D60BB5DB203DA05?sequence=1](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6239/MANUAL_DE_PROCEDIMIENTOS_DE_ENSAYOS_DE_SUELOS.pdf;jsessionid=5ABD5876EC2A7FCF8D60BB5DB203DA05?sequence=1)

Bowles, J. E. (1981). Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. In *Foreign Affairs* (Vol. 91, Issue 5).

Braja M. Das. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*.

Cajas, M. (2017). *Caracterización Morfotectónica De La Estructura Anticlinal Del Borde Oriental De La Cuenca De Quito, Utilizando Evidencia Geofísica Y Geomorfológica*.

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18946/3/CD-8340.pdf>

Camacho, G. (2021). *Determinación del factor de seguridad para comparar técnicas de estabilización de taludes utilizando GEO5 caso: parque El Milagro, Huaraz, Áncash, 2020*. Universidad César Vallejo.

Cárdenas, A., & Donoso, A. (2008). *Proposición de una Metodología Particular para Obtener la Capacidad de Soporte para Suelos Granulares sin Curva Proctor Definida*. Universidad de Magallanes.

Castañón, P. (2007). 4. *Estabilidad de taludes*. 124–160.

Catanzariti, F. (2016). *Estabilidad de taludes*.

<https://www.geostru.eu/es/blog/2016/06/13/estabilidad-de-taludes/>

Chacón, J. (2012). Movimientos de ladera : clasificación , descripción y evolución espacial y temporal Landslides : classification , description and temporal and spatial evolution. *Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y Al Ambiente*, 73–89.

Chimone, J. (2018). *Estudio de geología para ingeniería del deslizamiento presente en el km+18 de la vía Belén-Paz de Río en el Departamento de Boyacá a escala 1:2000*. Universidad

Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Copons, R., & Tallada, A. (2009). Movimientos de ladera. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 17(3), 284–294.

De Matteis, Á. F. (2003). Geología y Geotecnia Tema : Estabilidad de taludes. *Universidad Nacional de Rosario*, 42.

Dunkley, & Gaibor. (1997). *Mapa Geológico Cordillera Occidental del Ecuador entre 2°-3°S - escala 1 200.000*. <https://www.geoenergia.gob.ec/mapas-tematicos-1-200-000/>

Escobar, C., & Escobar, G. (2017). Análisis De Estabilidad De Taludes. *Geotecnia Para El Trópico Andino*, 167–235.

Espinoza, C., & Tapia, L. (2013). *Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del proyecto PACALORI* [Universidad de Cuenca].

<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/4572/1/TESIS.pdf>

Fredlund, D. G., & Krahn, J. (2011). Comparison of slope stability methods of analysis.

<https://doi.org/10.1139/T77-045>, 14(3), 429–439. <https://doi.org/10.1139/T77-045>

GeoQuantics. (2019). *Factores que influyen en la estabilidad de taludes y laderas en suelo* | *GeoQuantics*. <https://geoquantics.com/2019/10/21/factores-influyen-la-estabilidad-taludes-laderas-suelo/>

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Chunchi. (s.f.). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019-2023 Chunchi-Ecuador. *Revista Del Centre de Lectura de Reus*, 355.

Gómez, K., & Camelo, D. (2014). *Estudio de la permeabilidad en suelos arenosos contaminados con aguas aceitosas en una estratificación de mediante un modelo físico a escala reducida*. Universidad Católica de Colombia.

González De Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica - Taludes. In *Ingeniería Geológica* (pp. 430–

486).

https://www.ingebook.com/ib/NPcd/IB_BooksVis?cod_primaria=1000187&codigo_libro=1

237

Grases, J., Contreras, I., & Grase, G. (1997). *Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable frente a deslizamientos*. 97.

Ensayo de Corte Directo, 1.

Haro, J. (2014). *Guía de Laboratorio ASTM D 4892*.

Highland, L. (2004). *Landslide Types and Processes*. USGS, 4.

<https://doi.org/10.1002/2015GC006147>

Ibáñez, P. (2018). *Análisis a corto plazo de roturas de desmontes en terrenos cohesivos*.

Comparación entre los métodos de masa total (Taylor) y completos (Morgenstern & Price).

[Universidad Politécnica de Cartagena].

<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6354/tfg-ibana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Inostroza, D., King St-Onge, R. W., & Montenegro, J. (2017). *Aplicación Del Modelo Conceptual Para Procesos De Remoción En Masa a Un Talud De La Ruta Ch-160, Lota, Región Del Biobío*. 1–26. [http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1401/Inostroza H%2C Daniela.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1401/Inostroza%20Daniela.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Instituto Espacial Ecuatoriano, & MAGAP. (2013). *Cantón Chunchi Generación De*

Geoinformación Para La Gestión Del Territorio A Nivel Nacional Escala 1: 25000.

<http://app.sni.gob.ec/sni->

[link/sni/PDOT/ZONA3/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/CHIMBORAZO/CHUNCHI/IEE/MEMORIAS_TECNICAS/mt_chunchi_movimientos_en_masa.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/ZONA3/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/CHIMBORAZO/CHUNCHI/IEE/MEMORIAS_TECNICAS/mt_chunchi_movimientos_en_masa.pdf)

ISRM. (1981). *Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*. E.T. Brown.

Pergamon Press.

Laboratorio de Mecánica de Suelos. (2006). *Compactacion de suelos en laboratorio utilizando una energia modificada (56 000 pie-lb/pie³ [2 700 kN-m/m³]) (Proctor Modificado)*.

Lara, M. del P. (2007). Metodología para la Evaluación y Zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Apliación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana [Universidad de Chile]. In *Tesis, Universidad de Chile* (Vol. 53, Issue 9).

http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/celis_c/sources/celis_c.pdf

López, G. (2020). *Ensayos de compactación en carreteras: Proctor Normal y Modificado*. 8.

Mecanica Cientifica S.A. (2016). Aparatos para ensayos de materiales – Instrumentación Científica. *Polígono Industrial Los Ángeles, GETAFE (MADRID)*.

Medina, C., & Astudillo, J. (2013). Ubicación E Identificación De Los Principales Deslizamientos De La Vía Macará-Sabiango De La Provincia De Loja. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).

Melentijevic, S. (2005). *Estabilidad De Taludes En Macizos Rocosos Con Criterios De Rotura No Lineales Y Leyes De Fluencia No Asociada*. <http://oa.upm.es/722/1/04200507.pdf>

NEC -SE -GC Geotécnica y Cimentaciones, 27 (2015).

Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos. (1975). 4.- *Hoja Geológica Alausí - escala 1 100.000.pdf* (p. 1).

Montero, J. (2017). *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Publicaciones Especiales Geológicas.
<https://doi.org/10.32685/9789585978218>

Montoya, A. (2009). *Confiabilidad en estabilidad de taludes*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Mora, R. (1992). Fundamentos Sobre Deslizamientos. *Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible*

y *Salud Ambiental*, 1(A), 37.

- Ortuño, L. (2015). *Estabilidad de Taludes en Suelos Cálculo Tradicional por Equilibrio Límite y Método de Rebanadas*. <http://urielyasociados.es/img/formacion/CALCULO TEXTO.pdf>
- Pesantez, J. (2010). *Análisis E Implementación Del Método Unificado De Equilibrio Límite En La Evaluación De Estabilidad De Taludes*.
- Pineda, J., Adames, C., & Rodríguez, C. (2014). *Parámetros de resistencia al corte para interfases de arena - concreto: Propuesta de Investigación*. <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/StudentPapers/SP051.pdf>
- Polanco, A. (2012). *Prácticas de Laboratorio de Mecánica de Suelos I*. http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_DE_LAB_MEC_DE_SUELOS_I.pdf
- Puca, D. (2015). *Estudio De Las Condiciones Del Talud En La Avenida Rodrigo PACHACO Y Julio Enrique Paredes Del Cantón Ambato, Provincia De Tungurahua y Su Incidencia En La Seguridad De Los Habitantes Del Sector Y Usuarios De La Vía*. Universidad Técnica De Ambato.
- Quiñónez, A. (2011). Estudio Fotogramétrico Y Determinación De Los Límites De Alto Riesgo Del Barranco Las Ardillas De La Universidad De San Carlos De Guatemala, A Través De Modelos De Deslizamiento De Los Métodos Bishop, Morgenstern-Price Y Spencer [Universidad de San Carlos de Guatemala]. In *Emecanica.Ingenieria.Usac.Edu.Gt* (Issue 53). <http://emecanica.ingenieria.usac.edu.gt/sitio/wp-content/subidas/6ARTÍCULO-III-INDESA-SIE.pdf>
- Rodas, R., & Torres, M. (2015). Estudio de las Envolventes Consolidada-Drenada Mediante Ensayo de Corte Directo para el Análisis de Estabilidad de las Presas de Tierra del Proyecto Pacalori. In *Universidad de Cuenca*. Universidad de Cuenca.

Salas, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. *Métodos y Materiales*, 1(1), 11.

Sánchez, A. (2017). *Evaluación del peligro, vulnerabilidad y riesgo por inestabilidad de taludes en la colonia Gabriel Mancera, Gustavo A. Madero, Ciudad de México*. Instituto Politécnico Nacional.

Seguridad Minera. (2018). *Fallas que afectan la estabilidad de taludes*.

<https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/fallas-que-afectan-la-estabilidad-de-taludes/>

Suares Díaz, J. (2003). Elaboración De Modelos Conceptuales De Deslizamientos En Suelos Residuales En Colombia. In *Jornadas Geotecnicas de la Ingeniería Colombiana y V foro sobre Geotecnia de la sabana de Bogota*.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad Taludes en Zonas Tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda. (ed.)). Publicaciones UIS.

Suárez, J. (2009). *Deslizamientos Análisis geotécnico* (Primera ed). UIS.

U.S. Army Corps of Engineers. (2003). Slope Stability. *Enginnering and Desing*, EM 1110-2-1902.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176*, 11–33.

Anexos

Anexo 1: Modelo del Movimiento

Anexo 2: Perfil en Corte Según Resultados de Sondeos de Geofísica

Anexo 3: Ensayos de Laboratorio