	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>10-04-2012</b>	<b>A</b>	
Dependencia	Aprobado		Pág.	
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>i(84)</b>	

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	<b>JUAN CARLOS GUTIERREZ HERRERA MAICKOL FARID VELEZ VILLAMIZAR</b>
FACULTAD	<b>DE INGENIERIAS</b>
PLAN DE ESTUDIOS	<b>INGENIERIA CIVIL</b>
DIRECTOR	<b>ROMEL JESUS GALLARDO AMAYA</b>
TÍTULO DE LA TESIS	<b>ANÁLISIS PROBABILÍSTICO Y DE SENSIBILIDAD EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES UTILIZANDO LA APLICACIÓN SLOPE/W®</b>

### RESUMEN

(70 palabras aproximadamente)

EL PRESENTE TRABAJO CONTIENE UN ESTUDIO EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR MEDIO DE UN METODO NO DETERMINISTICO, EN EL CUAL EL SOFTWARE SLOPE/W CON AYUDA DEL METODO MONTECARLO ASOCIA EL FACTOR DE SEGURIDAD A UNA PROBABILIDAD DE FALLA. SE REALIZARON 12160 SIMULACIONES DE TALUDES DELIMITADOS POR SU ALTURA, ANGULO DE INCLINACION, ALTURA PIEZOMETRICA Y PARAMETROS RESISTENTES DEL SUELO. DICHS CALCULOS Y ANALISIS SE REALIZARON A TRAVES DEL SOFTWARE SLOPE/W CON EL METODO DE MORGENSTERN-PRICE.

### CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 84	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM: 1
-------------	---------	----------------	-----------



ANÁLISIS PROBABILÍSTICO Y DE SENSIBILIDAD EN LA ESTABILIDAD DE  
TALUDES UTILIZANDO LA APLICACIÓN SLOPE/W®

AUTORES:

JUAN CARLOS GUTIÉRREZ HERRERA

MAICKOL FARID VÉLEZ VILLAMIZAR

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

I.C. Esp. M.Sc. ROMEL JESÚS GALLARDO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Abril de 2016

## DEDICATORIA

El haber alcanzado este logro se lo dedico a mi Padre y a mi Madre quienes siempre estuvieron ahí conmigo, aconsejándome, guiándome, corrigiéndome y lo más importante brindándome todo su amor, esto es un pequeño agradecimiento a su esfuerzo por crear un gran camino para mí.

A Salva porque sin su gran esfuerzo y apoyo incondicional, esto no hubiera sido posible.

A mis cuatro hermanos que me han llenado de muchas alegrías, ustedes son mi motivación de ser una excelente persona.

A mis dos hermosas nonas Carmela y Obdulia por sus bendiciones, el siempre darme apoyo y palabras de aliento en todo momento de mi vida.

A mis amigos con los que he compartido momentos inolvidables donde todo pesar que he llegado a tener ha quedado atrás.

MAICKOL FARID VÉLEZ VILLAMIZAR.

## DEDICATORIA

En primer lugar quiero dedicarle este triunfo al señor todopoderoso dueño de los universos, por haberme dado la confianza para culminar esta etapa en mi vida y abrirme nuevos caminos en mi existencia.

Madre todos mis logros son por ti y para ti, mi mayor alegría es ser tu orgullo, diariamente le pido a Dios que me brinde la oportunidad de seguir alegrándote.

A mi tía María, mi segunda madre, que sin su apoyo incondicional nada de esto hubiera sido posible.

A mi chica Daniela, quien siempre ha sabido compartir y comprender mi universo.

A mi familia labradora de la tierra, quienes siempre han sido mi orgullo y motivo de felicidad constante.

A mis tres hermanitas y mi sobrino quienes hacen que la vida sea un mundo mágico.

JUAN CARLOS GUTIERREZ HERRERA.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al gran maestro creador del universo por permitir que este trabajo fuera llevado a cabo con éxito, a Él por llevarnos a su camino y en el encontrar la paz y la energía de vida necesaria para resistir toda tribulación que quiso intervenir en la culminación de esta meta.

A nuestros Padres debemos darles gracias infinitas por su lucha diaria y todo el amor brindado hacia nosotros que ha permitido que alcanzáramos esta meta.

Expresamos nuestro agradecimiento mutuo, tenemos claro que sin el esfuerzo, la confianza, el apoyo, la tolerancia y la gran amistad que ambos le invertimos a este proyecto no se hubiera logrado.

Estamos completamente agradecidos con el Magister Romel Gallardo, por poner su confianza, dedicación, conocimiento, interés y su completa disponibilidad en la dirección de este proyecto, damos gracias a Dios por él y le pedimos que le permita seguir siendo el gran maestro que es.

A los maestros que durante el transcurso de nuestra vida de una u otra manera han generado nuestro crecimiento espiritual como intelectual, a todos ellos muchas gracias.

Al Ingeniero German López Pineda por su voluntad de aportar el conocimiento sin importar la distancia, gracias a esto iniciamos con pie derecho este trabajo.

JUAN CARLOS GUTIERREZ HERRERA.  
MAICKOL FARID VÉLEZ VILLAMIZAR.

## Índice

### Introducción

<b>1. Título.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Planteamiento del problema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Formulación del problema .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Justificación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Objetivos .....</b>	<b>5</b>
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos. ....	5
<b>1.5 Delimitaciones .....</b>	<b>6</b>
1.5.1 Operativa.....	6
1.5.2 Conceptual.. .....	7
1.5.3 Geográfica.....	7
1.5.4 Temporal.....	7
<b>2. Marco referencial .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Antecedentes históricos .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Marco conceptual.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Marco teórico .....</b>	<b>16</b>
2.3.1 Método del equilibrio limite.. .....	17
2.3.2 Resistencia al esfuerzo cortante.).....	17
2.3.3 El círculo de Mohr. ....	18
2.3.4 Métodos de cálculo. ....	20
2.3.5 Tipos de falla.....	23
2.3.6 Incertidumbre en la geotecnia.....	26
2.3.7 Probabilidad.....	29
2.3.8 El método de Monte Carlo.....	31
<b>2.4 Marco legal .....</b>	<b>32</b>
<b>3. Diseño metodológico.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Tipo de investigación .....</b>	<b>33</b>

<b>3.2 Población.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Muestra .....</b>	<b>33</b>
3.3.1    Parámetros geomorfológicos. ....	34
3.3.2    Parámetros de resistencia del suelo.....	35
3.3.3    Cargas.. .....	35
<b>3.4 Técnicas de recolección de información.....</b>	<b>36</b>
<b>3.5 Proceso metodológico.....</b>	<b>36</b>
<b>4. Definición de los resultados .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Realizar un análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes     haciendo uso del software SLOPE/W®.....</b>	<b>37</b>
4.1.1    Recolección de información.. .....	37
4.1.2    Análisis probabilísticos.....	40
4.1.3    Análisis de sensibilidad. ....	42
4.1.4    Generación de bases de datos. ... ..	42
4.1.5    Clasificación de la información. ....	42
4.1.6    Ordenar información. ....	43
4.1.7    Generación de la cartilla de ábacos.....	43
<b>4.2 Hacer uso del análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes     variando los parámetros determinísticos del suelo utilizando la simulación Monte-     Carlo del software SLOPE/W® .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Elaborar ábacos en donde se represente la variación del factor de seguridad y la     probabilidad de falla, en función de los diferentes parámetros que afectan     directamente la estabilidad de taludes. ....</b>	<b>45</b>
<b>4.4 Crear un manual de usuario para el uso del software Slope/W en el análisis     probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes. ....</b>	<b>55</b>
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>56</b>
<b>6. Recomendaciones.....</b>	<b>59</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>61</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>63</b>
Apéndice A. Manual SLOPE/W® .....	64
Apéndice B. Ábacos.....	65

Apéndice C. tablas de probabilidades de falla.....	66
Apéndice D. Modelos en SLOPE/W® .....	67
Apéndice E. Tablas de Excel (Recolección de datos).....	68
Apéndice E. Tablas de Excel (datos graficas).....	69



## Lista de Tablas

Tabla 1. Consideraciones de carga a introducir en los modelos.....	35
Tabla 2. Propiedades de material arcilloso de la formación algodonala.....	39
Tabla 3. Propiedades de material friccionante de la formación algodonala.....	39
Tabla 4. Valores típicos del coeficiente de variación.....	40
Tabla 5. Valores de los rangos modificados de los parámetros.....	46

## Lista de Figuras

Figura 1. Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud.....	18
Figura 2. Envolvente de falla y círculo de Mohr.....	19
Figura 3. Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.....	20
Figura 4. Esquema de relación (d/L).....	22
Figura 5. Diagrama para determinar el factor $f_0$ para el método de Janbú.....	22
Figura 6. Esquema del método de Spencer. Adaptada de.....	23
Figura 7. Falla Rotacional.....	24
Figura 8. Fallas Traslacionales.....	25
Figura 9. Distribucion del grafico radial.....	48
Figura 10. Ábaco CL-H=12-B45.....	50
Figura 11. Procedimiento para determinar el factor de seguridad.....	52
Figura 12. Pantalla de inicio de la tabla de probabilidad del material CL y altura 12 metros....	53
Figura 13. Tabla de probabilidad del material CL, altura 12 metros y beta 45°.....	54

## Resumen

El presente trabajo contiene un estudio en el análisis de estabilidad de taludes por medio de un método no determinístico, en el cual el software SLOPE/W<sup>®</sup> con ayuda del método Montecarlo asocia el factor de seguridad a una probabilidad de falla, es decir se indica el nivel de amenaza del talud de estudio. Se realizaron 12160 simulaciones de taludes delimitados por su altura, ángulo de inclinación, altura piezométrica y parámetros resistentes del suelo, dichos cálculos y análisis se realizaron a través del software SLOPE/W<sup>®</sup> con el método de Morgenstern-Price. Los análisis de sensibilidad en donde se observa la variación del factor de seguridad se representara por medio de ábacos y los análisis probabilísticos en donde se muestran las probabilidades de falla asociadas al factor de seguridad, se presentaran por medio de tablas. La cartilla de ábacos es aplicable a taludes conformados por suelos clasificados por la S.U.C.S como arcillas (CL) y arenas arcillosas (SC) o que sus parámetros se encuentren dentro de los rangos de variación especificados dentro del proyecto.

## Introducción

El análisis de estabilidad de taludes es un tema muy complejo, el cual implica muchas variables diferentes que en conjunto se comportan como un sistema dinámico, aunque generalmente se evalúan por medio de métodos determinísticos, que evalúan la estabilidad de un talud a partir de un coeficiente de seguridad que se asume constante e invariable, sin embargo en la comunidad ingenieril es de conocer que los taludes están expuestos a las variaciones de los diferentes parámetros que conforman el estado tensional del suelo como lo son los parámetros Cohesión, Angulo de Fricción, Peso Específico, Altura de Nivel Freático quienes son alterados en general por fenómenos naturales. Además dichas variaciones también se presentan por medio de cortes y cambio de geometría asociados a factores antrópicos, es principalmente por este motivo que en el presente estudio se pretende involucrar la posible variación de los parámetros inherentes en la estabilidad de taludes y representar la forma en como varia el factor de seguridad por medio de un análisis de sensibilidad y probabilidad en dos tipos diferentes de suelos de la formación algodonada de Ocaña norte de Santander.

El software SLOPE/W<sup>®</sup> permite modelar y simular cualquier situación que se pueda presentar en la realidad. Además presenta herramientas incorporadas como el método de Montecarlo para realizar análisis probabilísticos y de sensibilidad. Por esta razón fue el medio que se eligió para realizar la investigación, además con ánimo de que la comunidad estudiantil y profesional utilice la herramienta para el análisis de estabilidad de taludes se introducirá un

manual en donde se describa todos los pasos necesarios, para utilizar el software SOLPE/W<sup>®</sup> y desarrollar análisis no determinísticos.

## 1. Título

Análisis probabilístico y de sensibilidad en la estabilidad de taludes utilizando la aplicación SLOPE/W®.

### 1.1 Planteamiento del problema

Desde que la humanidad empezó a registrar su historia, esta ha sido víctima de catástrofes a causas de diferentes fenómenos naturales; dentro de esos desastres, los deslizamientos han dejado un saldo de innumerables pérdidas humanas, así como grandes costos económicos, “presentándose estos primordialmente en las zonas urbanas aledañas a los diferentes sistemas montañosos del mundo” (Suarez, 1998, p. 2).

De acuerdo con lo anterior, y para el contexto de Colombia, el país no está exento de estos eventos debido a que está ubicado en la gran cordillera de los Andes, una de las cadenas montañosa más grande del mundo, que además en nuestro país se ramifica en tres (cordilleras Occidental, Central y Oriental) generando así una serie de accidentes geográficos que son cuna de grandes deslizamientos.

En tal sentido, y para el caso de lo regional, como es sabido, a través de los medios de comunicación, Norte de Santander ha presentado riesgos por estabilidad de taludes, tal es “el caso del mes de abril de 2011 en donde la única vía que comunica la capital del departamento

con el municipio de Ocaña se vio interrumpido el flujo vehicular debido a deslizamientos masivos de tierra” ([somoslarevista.com](http://somoslarevista.com) ,17 de abril de 2015).

En la ciudad de Ocaña, dichos riesgos ocurren por la alteración de la geometría natural, es decir, la intervención humana y sus procesos antrópicos, relacionada directamente con el acelerado crecimiento poblacional que se presenta de una forma desordenada e improvisada, donde el factor detonante de esta situación, es el hecho de que en los últimos años ha llegado un gran número de víctimas de desplazamiento por la violencia generada por el conflicto armado.

Lo cierto es que infortunadamente gran parte de esta población, al no tener los recursos para adquirir su propio terreno, deciden sin precaución ubicarse en terrenos que generalmente corresponde a zonas de ladera, e intervienen las mismas realizando cortes, inicialmente de poca magnitud pero posteriormente al ir ampliando sus viviendas éstos adquieren una altura considerable y comienzan los problemas de estabilidad de los taludes.

Debemos agregar que, debido a que no se implementan las obras de protección requeridas, los taludes son muy propensos a sufrir algún tipo de fenómeno de remoción en masa, los cuales requieren de las medidas ingenieriles adecuadas para disminuir los efectos de un posible deslizamiento, y generalmente no se han realizado.

En razón de lo anterior y tomando en cuenta la información brindada por los medios, es evidente que en nuestra región el mayor número de deslizamientos se producen en épocas invernales, a causa del aumento del volumen de agua proporcionado por las intensas lluvias, que

generan ascenso del nivel freático y pérdida de resistencia en los taludes, además las fuerzas adicionales al peso propio como las sobrecargas y fuerzas sísmicas, excavaciones o socavaciones al pie del talud son cambios que tienen gran influencia en la estabilidad de los taludes.

Cabe recalcar, que la combinación de todos estos elementos convierte a los deslizamientos en un problema complejo, el cual es difícil de abordar debido a que los análisis de estabilidad de taludes requieren de estudios de suelos y herramientas que en la mayoría de los casos no son fáciles de conseguir y que tienen un costo elevado. Podemos agregar, que en los casos donde se puede realizar análisis de estabilidad de taludes, éstos se hacen de forma determinística arrojando un factor de seguridad constante en todo el talud el cual cuantifica la estabilidad de un talud.

Como vimos anteriormente, los deslizamientos son potencialmente desestabilizadores de la sociedad y la falta de herramientas sencillas y de fácil acceso hace que sea aún más difícil darle solución a éste problema, por esta razón se ve reflejada la necesidad de una herramienta útil y sencilla, que permita conocer como inciden los diferentes factores condicionantes y detonantes en la estabilidad de un talud, además de que no solo nos muestre el valor del factor de seguridad de un talud, sino también la probabilidad de falla con la que pueda ocurrir el deslizamiento, para diferentes modelos de taludes. Esto genera una situación que amerita ser investigada y que para este proyecto será abordada por medio de un análisis general probabilístico y de sensibilidad en la estabilidad de taludes.



## 1.2 Formulación del problema

¿Puede el análisis probabilístico y de sensibilidad a través del software SLOPE/W<sup>®</sup>, generar una herramienta útil y sencilla para el análisis de estabilidad de taludes?

## 1.3 Justificación

La universidad Francisco de Paula Santander Ocaña está comprometida con la gestión del riesgo de desastres que es un proceso social encaminado hacia el desarrollo, para así asegurar la sostenibilidad y el equilibrio social de la comunidad. Los deslizamientos en los suelos son desequilibradores potenciales de la sociedad, es por esta razón que El Grupo de Investigación en Geotecnia y Medio ambiente – GIGMA debe dar prioridad a investigaciones que estén encaminadas a proveer soluciones a este tipo de problemáticas.

A nivel mundial la estabilidad de taludes está siendo estudiada para lograr proteger a las diferentes poblaciones que estos llegarían a afectar. Generalmente estos estudios se basan en métodos determinísticos que no tienen en cuenta la variabilidad de los parámetros inherentes en la estabilidad de un talud, es por eso que en busca de desarrollar un análisis más confiable se han venido implementando métodos alternativos como los análisis de sensibilidad y probabilísticos, que nos permiten por medio de la variación de parámetros presentes en el perfil de suelo determinar el factor de seguridad con una probabilidad de falla asociada, además de dar a conocer cuáles son los parámetros más relevantes para la estabilización de taludes.

Como se dijo anteriormente en el planteamiento del problema, estos análisis pueden ser realizados por medio de herramientas como el software SLOPE/W<sup>®</sup>, debido a que aumenta la eficiencia y la precisión en los cálculos, pero su adquisición es costosa y su uso aunque sencillo solo es conocido por profesionales que se desempeñan en el área de geotecnia. En conclusión, el desarrollo de la presente propuesta se justifica en cuanto pretende lograr la creación de una herramienta útil y sencilla compuesta por una serie de ábacos que permitan a la comunidad estudiantil y/o profesional, determinar el nivel de amenaza y las probabilidades de falla, que van en función de sus características geométricas, físicas y mecánicas tenga cierto talud. Además con ánimo de proveer conocimientos basados en experiencias informáticas y encaminadas a generar profesionales integrales, se desarrollará una guía metodológica que permita hacer uso de las herramientas que posee la aplicación SLOPE/W<sup>®</sup> para el análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes.

## **1.4 Objetivos**

**1.4.1 Objetivo general.** Realizar un análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes haciendo uso del software SLOPE/W<sup>®</sup>.

**1.4.2 Objetivos específicos.** Hacer uso del análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes variando los parámetros determinísticos del suelo utilizando la simulación Monte-Carlo del software SLOPE/W<sup>®</sup>.

Elaborar ábacos en donde se represente la variación del factor de seguridad y la probabilidad de falla, en función de los diferentes parámetros que afectan directamente la estabilidad de taludes.

Crear un manual de usuario para el uso del software Slope/W<sup>®</sup> en el análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes.

## **1.5 Delimitaciones**

**1.5.1 Operativa.** Para llevar a cabo el análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes se utilizara el software SLOPE/W<sup>®</sup>, que nos permite la modelación de los perfiles de suelo para tal fin y también nos brinda las herramientas necesarias para agregarle las diferentes propiedades de los suelos, teniendo como criterio de falla el modelo Mohr coulomb, que emplea parámetros de resistencia del suelo constantes, es por eso que todas las variables que el software nos permita modelar, como (geometría, peso específico, nivel freático, cohesión y el ángulo de fricción) se harán variar desde el valor cero (0) hasta su valor límite, para así poder establecer la forma de como varia el factor de seguridad en función de los parámetros inherentes en el estado tensional del suelo, además para crear los ábacos en los que se podrá apreciar la variación del factor de seguridad se necesitará la aplicación informática Microsoft Excel, debido a esto se hace necesario tener los conocimientos en estos software para el uso de dichas herramientas sistemáticas.

**1.5.2 Conceptual.** Los análisis probabilísticos y de sensibilidad en la estabilidad de taludes se pueden realizar a través de software como en SLOPE/W<sup>®</sup>, ya que dependiendo de las diversas situaciones los elementos que conforman el estado tensional del suelo pueden presentar variabilidad; con ayuda del método Monte-Carlo integrado en dicho software, es posible determinar la probabilidad de falla de cierto talud, debido a que este toma en cuenta simultáneamente las diferentes distribuciones de probabilidades, así como los diferentes rangos de los valores de los parámetros indispensables en la estabilidad de taludes, además este estudio presentara la variación del factor de seguridad por medio de un análisis de sensibilidad de los parámetros presentes en el perfil del suelo, el cual análogamente al análisis de probabilidad hace uso de la distribución normal y los métodos de cálculo del factor determinístico como: (ordinario) de Fellenius, Bishop simplificado, Morgenstern-Price y Spencer los cuales están integrados en el programa SLOPE/W<sup>®</sup>.

**1.5.3 Geográfica.** Debido a que la presente investigación se desarrollara en un ámbito general, sus resultados podrán ser aplicados en cualquier parte del mundo.

**1.5.4 Temporal.** El proyecto se desarrollara en un periodo que comprende desde noviembre del 2015 a abril del 2016.

## 2. Marco referencial

### 2.1 Antecedentes históricos

Para empezar a hablar de los antecedentes que dan pie a este proyecto debemos conocer dos sucesos importantes para la ingeniería geotécnica. El primero ocurrió en Francia durante el año de 1776 donde el reconocido ingeniero Charles-Agustín de Coulomb propuso un mecanismo para estudiar la resistencia del suelo el cual consiste en aceptar que dicho material falla por esfuerzo cortante a lo largo de un plano de deslizamiento, dentro de éste mecanismo introdujo un coeficiente que representa una constante del material y es conocido como ángulo de fricción interna. Coulomb observó que en ciertos suelos, como las arcillas, parecían tener una resistencia al esfuerzo cortante independiente del esfuerzo normal aplicado a esta resistencia se le conoce en estos días como cohesión. El segundo suceso tuvo procedencia en 1882 donde el ingeniero civil alemán, Otto Mohr formuló la Teoría General de la Resistencia que se basa en representar gráficamente en el plano de Mohr, los estados de esfuerzo en el momento de la falla del material, La curva tangente a los círculos que representan dicho estado de esfuerzos se le denomina Envolvente de Mohr- Coulomb (Arquys Arquitectura, s.f).

Ahora bien, los sucesos mencionados anteriormente, como se dijo, fueron de gran importancia para la geotecnia y además para lo que conocemos hoy como análisis de estabilidad de taludes, debido a que los primeros métodos desarrollados durante la historia de éste análisis se basaron en la teoría de Mohr- coulomb para determinar los parámetros de resistencia del suelo,

claves en la estabilidad de taludes. Habiendo dicho lo anterior, y entrándonos en este marco, de acuerdo con, **Cheng & Lau (2014)**

la estabilidad de taludes surge a principios del siglo XX en Europa, donde después de una serie de deslizamientos en las vías férreas de Suecia, La Junta Real de Ferrocarriles del Estado estableció una comisión interdisciplinaria conformada por ingenieros y geólogos, para investigar las causas y proponer las posibles soluciones a este problema. Éste grupo interdisciplinario se constituyó como la "Comisión Geotécnica de Ferrocarriles del Estado" y trabajó entre los años de 1914 y 1922. Su informe final, fue la primera publicación en usar la palabra "geotecnia". En 1916, dos años después de la creación de la junta, se presentó el famoso caso del deslizamiento del muelle Stigberg en el puerto de Gotemburgo, el cual sucedió a tan solo un año de su construcción. Debido a éste suceso, también fue creado un comité especial para puertos de Suecia, con la tarea de descubrir las razones del deslizamiento y de formular recomendaciones para el diseño de un nuevo muelle. Este análisis del muelle de Stigberg, empleó el método de círculos de falla, el cual fue utilizado anteriormente por Alexander Collins en Francia, e implementado para este caso por Sven Hultin, profesor en el Instituto Tecnológico de Chalmers en Gotemburgo, y por Knut Pettersson, ingeniero del puerto de Gotemburgo, quienes efectuaron un retro análisis y así calcularon la estabilidad rotacional de la falla del muelle. **(p. 2).**

Luego según **GEO-SLOPE International Ltd (2008)** nos dice que:

Después de esto, se generaron una serie de fallas en los diferentes muelles suecos, los cuales llamaron la atención de la comunidad científica para iniciar con los primeros intentos de cuantificar la estabilidad de taludes, utilizando el método de las tajadas con el método de equilibrio límite. Éste método sistemático culminó en el establecimiento del Método de Fellenius, o conocido también por el Método de las dovelas **(p. 1).**

Posteriormente y con el paso del tiempo, se mostraron diferentes investigaciones en donde se desarrollaron algunos métodos y ajustes al modo de investigar la estabilidad de taludes, entre éstos los más destacados por escala de tiempo tenemos: En 1937 La Carta de estabilidad de Taylor o series de Taylor como se conocen actualmente; luego a mediados de la década de 1950s, el Método Simplificado de las tajadas de Bishop asegura que los momentos se encuentran en equilibrio; al mismo tiempo, Janbu extendió el deslizamiento circular a una superficie de deslizamiento general (GEO-SLOPE International Ltd, 2008).

Seguidamente y continuando este marco, con el advenimiento de los ordenadores electrónicos en la década de 1960s y principios de la década de los 1970s, fue posible manejar fácilmente los procedimientos iterativos inherentes al método, lo que condujo a formulaciones matemáticamente más rigurosas, tales como las desarrollados por Morgenstern y Price en 1965, quienes aseguraron que los momentos y las fuerzas se encuentran simultáneamente en equilibrio, también, las fuerzas paralelas entre tajadas de Spencer en 1967, y el enfoque sísmico horizontal de Sarma en 1973. Todos estos trabajos

dieron como resultado el Método Moderno Generalizado de las Tajadas (GMS) por sus siglas en inglés (GEO-SLOPE International Ltd, 2008, pág. 1).

En esta época se empezó a dársele importancia a la incertidumbre en la ingeniería geotécnica y por ende se integró la probabilidad en el estudio de estabilidad de taludes iniciando con los trabajos basados con el método de primer orden segundo momento conocido como FOSM por sus siglas en inglés. Acerca de esto el ingeniero Kerguelen en su tesis magistral nos dice:

Los estudios realizados por Wu y Kraft (1970), Cornell (1971), Alonso (1976), Tang et al. (1976) y Vanmarcke (1977) coinciden en establecer que el análisis probabilístico de la estabilidad de taludes proporciona un mejor conocimiento de la seguridad, ya que ofrece la posibilidad de entender en términos de probabilidad el grado de confianza del cálculo del factor de seguridad considerando la incertidumbre asociada al talud.  
(Kerguelen, 2009, pág. 8)

Durante las siguientes dos décadas se pudo apreciar un gran interés por relacionar la teoría probabilística en el análisis y diseño de taludes, todos estos trabajos llegaron a usar metodologías particulares y a menudo complejas de calcular, gracias al implemento de la tecnología computacional se aceleró el avance en conocimiento, desarrollando los diferentes algoritmos que permitieron obtener la solución de los cálculos tediosos. “Uno de estos algoritmos fue desarrollado por el profesor D.G. Fredlund en la Universidad de Saskatchewan, siendo éste, el primer código de programación para cálculo de estabilidad de taludes, del software conocido actualmente como SLOPE/W<sup>®</sup>” (Kerguelen, 2009, pp. 9-10).

En esta misma época muchos personajes empezaron a desarrollar metodologías y algoritmos, con el fin de ampliar los rangos de cálculo y garantizar que los análisis probabilísticos fueran adoptados en la determinación de la estabilidad y también llegaron a ser más precisos. Dentro de los personajes que podremos nombrar están: DeGroot y Baecher en 1993 hacen uso del método de máxima probabilidad, con el que calculan la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, gracias a esta técnica se introduce el cálculo de la variabilidad de los parámetros geotécnicos en algoritmos de computador, luego en 1994 Christian resalta la aplicación del método FOSM, con el fin de incorporar incertidumbre al

análisis de estabilidad de taludes. Este trabajo modela probabilísticamente los parámetros del suelo a partir de información de laboratorio y de campo donde se muestra la influencia de la incertidumbre de diferentes parámetros en la confiabilidad del talud, más tarde en 1999 Wang, analiza probabilísticamente los taludes de una mina de carbón localizada en china, en este análisis tomaron en cuenta la variabilidad de la resistencia de la roca en los taludes a partir de la aplicación del método de Montecarlo se calcularon las probabilidades de falla con una distribución exponencial de la resistencia de la roca, de este estudio se muestran algunos datos sobre probabilidades de falla e índices de confiabilidad aceptados para taludes en excavaciones a cielo abierto en China y América (Kerguelen, 2009).

Empezando el nuevo milenio, se ve marcada la aceptación de la probabilidad en la ingeniería geotécnica y es una constante en diversas investigaciones, **(Kerguelen, 2009) menciona:**

Es hasta el año 2003, en donde Baecher y Christian, crean el primer libro enfocado exclusivamente a la aplicación de la confiabilidad y la estadística en la ingeniería geotécnica, además, varios software como el Slope/W<sup>®</sup> incorporan rutinas de análisis probabilísticos a sus métodos determinísticos de análisis facilitando el cálculo con variables aleatorias y también análisis de sensibilidad, para cálculos de probabilidades de falla y factores de seguridad críticos de cada talud. Ya para el año 2007 se destacaron los trabajos hechos por los siguientes grupos de investigadores: Bastante et al. Donde con el uso del método de Monte-Carlo, buscaron optimizar el diseño de la operación minera, adicionando el impacto de la incertidumbre económica. Griffiths y Fenton publican un libro que recopila métodos probabilísticos con aplicación en la ingeniería geotécnica. En el año 2008 se hace la publicación de un libro guía para la aplicación de todos los métodos probabilísticos conocidos hasta el momento; éste libro llamado “Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering” y creado por Phoon, contiene información sobre técnicas computacionales para la implementación de los métodos probabilísticos y su aplicación en diversos problemas geotécnicos **(pp. 15-19)**.

Para finalizar con este recuento histórico, tenemos los estudios más recientes sobre esta temática, en el año 2011 durante la conferencia geotécnica transcurrida en la ciudad de Toronto, Canadá, los ingenieros Hidalgo y Assis (2011) presentaron su estudio llamado: “Evaluación de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de un talud excavado en suelos residuales” En este trabajo se avaluó el efecto de la incertidumbre de los parámetros de resistencia al corte de los suelos sobre los análisis de estabilidad de un talud de una carretera en Antioquia, Colombia, excavado en suelos residuales. Se analizaron algunas fuentes de incertidumbre en los diseños



geotécnicos y métodos para su evaluación. Se evaluó la estabilidad de un talud de 20 m de altura e inclinación promedio de 45 grados, calculando la probabilidad de falla. Posteriormente, se realizó un análisis con lógica difusa usando el método del vértice para calcular el factor de seguridad y la probabilidad de falla. En el siguiente año fue publicado en la revista Ciencias De La Tierra de la Universidad Nacional de Colombia, un artículo en donde se muestran los estudios de estabilidad y probabilidad aplicados a dos taludes ubicados en la autopista que comunica a Medellín con la ciudad de Bogotá, en este estudio fueron evaluadas las condiciones de estabilidad para diferentes inclinaciones con el fin de encontrar la condición más favorable de estabilidad, debemos agregar que este estudio es el más cercano a lo que se pretende llegar en esta investigación, debido a que análogamente a lo que la Doctora Yamile Valencia y el Magister Luis Javier Escobar lograron con este estudio en esos dos taludes, en este trabajo, con un estudio similar y con ayuda del software SLOPE/W<sup>®</sup> se busca crear una herramienta útil y de fácil uso, en el ámbito general y aplicado a los diferentes tipos de taludes modelados en el presente trabajo.

## **2.2 Marco conceptual**

Antes de abordar las teorías referentes al análisis probabilístico y de sensibilidad en la estabilidad de taludes es necesario tener claro conceptos esenciales que permitirán el apropiado entendimiento del presente trabajo de grado. A continuación se muestra el listado de conceptos:

Talud: “Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su

conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente”. (Suarez Díaz, 1998, p.3)

Peso específico: “es la relación entre el peso de suelo por el volumen unitario”.

**Das (2001, p.19)**

Angulo de Fricción: Es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:  $\text{Coeficiente de rozamiento} = \text{Tan } \varphi$

El ángulo de fricción depende de varios factores (Bilz, 1995) entre ellos algunos de los más importantes son:

- Tamaño de los granos.
  - Forma de los granos.
  - Distribución de los tamaños de granos.
  - Densidad”.
- (Suarez Díaz, 1998, pág.81)

Cohesión: La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión.

En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina Suelos no Cohesivos. (Suarez Díaz, 1998, pág.82)

Altura de nivel freático: lo define como: “Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua, la presión en el agua es igual a la presión atmosférica. La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud” (Suarez, 1998, p.4).

Continuando con este marco, tenemos los siguientes conceptos que definen lo básico sobre probabilidad y sensibilidad que ayudaran en la comprensión del tema principal en esta investigación:

Métodos probabilísticos: según “Los métodos probabilísticos son aquellos que permiten la evaluación de la distribución de probabilidades de una variable dependiente en función del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes que la generan” **(Carvalho Maia, 2003, p. 50)**

Método de Monte Carlo: “es una metodología que permite determinar la función de distribución de frecuencia de la variable dependiente analizada mediante la generación de números aleatorios uniformes que representan las variables independientes envueltas” **(Hidalgo y Assis 2011)**.

Probabilidad de Falla: Escobar y Valencia, (2012) la definen como la parte del área bajo la curva de distribución de probabilidad del F.S. menor que 1,0, es decir, el porcentaje de probabilidad donde el factor de seguridad equivale a uno.

Análisis de Sensibilidad: El análisis de sensibilidad consiste en establecer un rango de valores dentro del cual puede variar un determinado parámetro y determinar la variación del factor de seguridad y el tipo de rotura. Para ello se especifica un valor mínimo y un valor máximo para cada parámetro sometido al análisis de sensibilidad. En el procedimiento cada parámetro es sujeto a variación en incrementos uniformes entre el Valor Máximo y el Valor Mínimo y se calcula el Factor de Seguridad a través del método phi-c reduction (fase 3). Cuando se está variando un parámetro los demás pertenecen constantes en sus valores principales. Esto resulta en un gráfico de Factor de Seguridad Vs. Parámetro de entrada y permite determinar la sensibilidad del factor de seguridad a cambios en los parámetros de entrada. (Membreño Alarcón, 2012)

Para finalizar con este marco, habiendo visto los conceptos respectivos a la temática principal de esta investigación, debemos agregar conceptos que al igual que los anteriores son muy importantes para este trabajo, debido a que se encargan de definir lo referente a la gestión del riesgo y que corresponde al impacto social que tiene el presente proyecto. Los conceptos son los siguientes:

**Gestión del riesgo:** Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible. (Ley 1523, 24 de abril de 2012).

**Amenaza:** La amenaza es una condición con el potencial de causar una consecuencia indeseable. Una descripción de amenaza a deslizamientos debe incluir las características de éstos, el volumen o áreas de los movimientos, las profundidades, las velocidades y su probabilidad de ocurrencia. La amenaza es la probabilidad de que ocurra un deslizamiento particular en un determinado tiempo. (Ley 1523, 24 de abril de 2012).

**Vulnerabilidad:** Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. (Ley 1523, 24 de abril de 2012).

**Desastre:** Es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antrópicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del Estado y del sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción. (Ley 1523, 24 de abril de 2012).

**Riesgo de desastres:** Corresponde a los daños y pérdidas que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional en un periodo de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. (Ley 1523, 24 de abril de 2012).

Reducción del riesgo: Es el proceso de la gestión del riesgo, está compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, entiéndase: mitigación del riesgo y a evitar nuevo riesgo en el territorio, entiéndase: prevención del riesgo. Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera. (Ley 1523, 24 de abril de 2012).

### 2.3 Marco teórico

Para realizar los análisis probabilísticos y de sensibilidad a través del programa SLOPE/W<sup>®</sup>, es necesario tener claras las diferentes teorías y conceptos que componen la estabilidad de taludes.

Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad, entendiéndose por ello, algo tan simple como poder decir que en un momento dado, cuál será la inclinación adecuada para mantener estable determinado talud, generalmente esta inclinación es la más escarpada que se sostenga en el tiempo sin caerse. (De Matties, 2003, pág.4).

Por esta razón surge la necesidad de determinar la estabilidad de cierto talud, esto es labor de los ingenieros civiles que tienen que efectuar cálculos para verificar la seguridad de taludes naturales, taludes de excavaciones y de terraplenes compactados. Este proceso, llamado análisis de la estabilidad de taludes, implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo, sin embargo el análisis de la estabilidad de un talud no es tarea fácil; la evaluación de variables tales como la estratificación del suelo y sus parámetros de resistencia cortante resulta una tarea compleja de hacer, además la infiltración a través del talud y la selección de una superficie de deslizamiento potencial se agregan a la complejidad del problema. (Das, 2001).

Es por esto que generalmente los análisis se realizan utilizando modelos determinísticos como en el caso del método del equilibrio límite, que dejan mucho espacio para la incertidumbre, debido a que se considera un modelo idealizado con parámetros constantes lo cual es un poco

desviado de la realidad, porque como es sabido por la comunidad ingenieril los parámetros inherentes en la estabilidad de taludes en la realidad son generalmente variables.

**2.3.1 Método del equilibrio limite.** El método del equilibrio limite se basa exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable, éste no tienen en cuenta las deformaciones del terreno y supone que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte, es decir se mantiene constante a lo largo de dicha superficie. (Pereira, 2012).

Ahora bien, el método evalúa la estabilidad de taludes a partir de un factor determinístico y constante, Entonces La tarea del ingeniero encargado de analizar la estabilidad de un talud es determinar el factor de seguridad. Fellenius (1927), definió el factor de seguridad como:

$$\mathbf{F.S.} = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

Dónde:

F.S: Factor de seguridad con respecto a la resistencia.

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

$\tau_f$  : Resistencia cortante promedio del suelo.

Como se puede observar en la anterior formula, la resistencia al cortante es la base para determinar el F.S que define la estabilidad de un talud. (Suarez Díaz, 1998).

**2.3.2 Resistencia al esfuerzo cortante.** La determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos puede decirse que constituye uno de los puntos fundamentales de toda la mecánica de suelos. En efecto, una valoración correcta de ese concepto constituye un paso previo imprescindible para intentar, con esperanzas de éxito, cualquier aplicación de la

mecánica de suelos al análisis de estabilidad de las obras civiles. (Juárez Badillo, 2005, pág. 352).

Luego para determinar la resistencia cortante del suelo, se utiliza el criterio de falla de Mohr-coulomb el cual se describe brevemente a continuación:

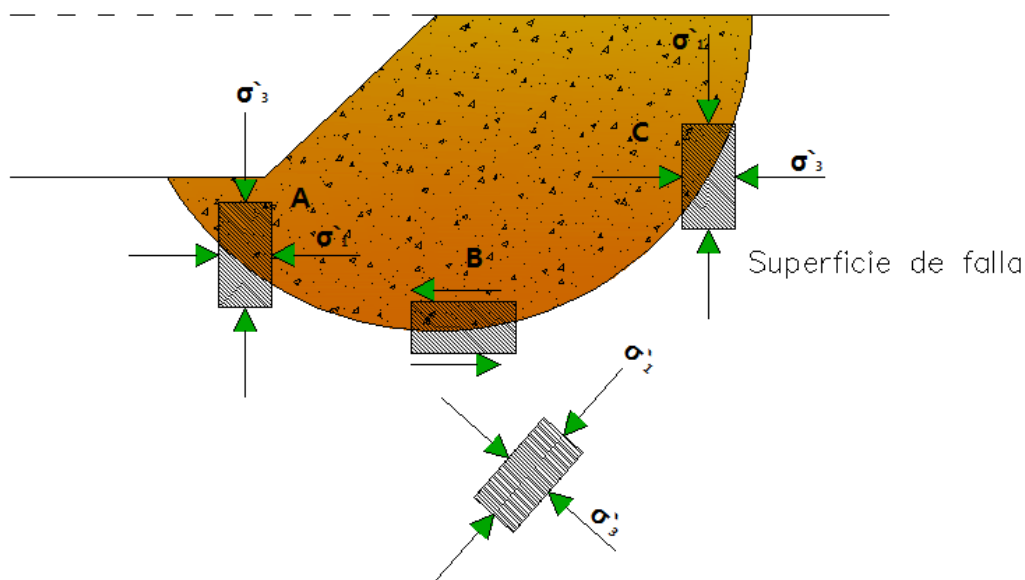


Figura 1. Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud. Fuente: Adaptada de:

(Suarez, 1998, p. 84).

En un análisis en dos dimensiones como lo indica la figura 1, los esfuerzos en un punto pueden ser representados por un elemento infinitamente pequeño sometido a los esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , y  $\tau_{xy}$ . Si estos esfuerzos se dibujan en unas coordenadas  $\tau - \sigma$ , se puede trazar el círculo de Esfuerzos de Mohr. Para definir los valores de  $\sigma$  máximo ( $\sigma_1$ ) y  $\sigma$  mínimo ( $\sigma_3$ ), conocidos como Esfuerzos principales, se utiliza el círculo de Mohr (Suarez, 1998, p. 85).

**2.3.3 El círculo de Mohr.** Se utiliza para representar o describir la resistencia al cortante de los suelos, utilizando la envolvente de falla Mohr – Coulomb, lo cual equivale a que una combinación crítica de esfuerzos se ha alcanzado. Por eso los esfuerzos por encima de la envolvente de falla no pueden existir. La envolvente de falla Mohr - Coulomb es generalmente una línea curva que puede representarse como se muestra en la ecuación. (2):

$$\tau = A (\sigma')^b \quad (2)$$

Dónde:

$\tau$  = Resistencia al cortante

$\sigma'$  = Esfuerzo normal efectivo

A y b = Constantes

En la práctica normal de Ingeniería, generalmente, esta curva se define como una recta aproximada dentro de un rango seleccionado de esfuerzos (Figura 2.)

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (3)$$

Dónde:

$c'$  = Intercepción del eje de resistencia (cohesión).

$\phi'$  = Pendiente de la envolvente (ángulo de fricción).

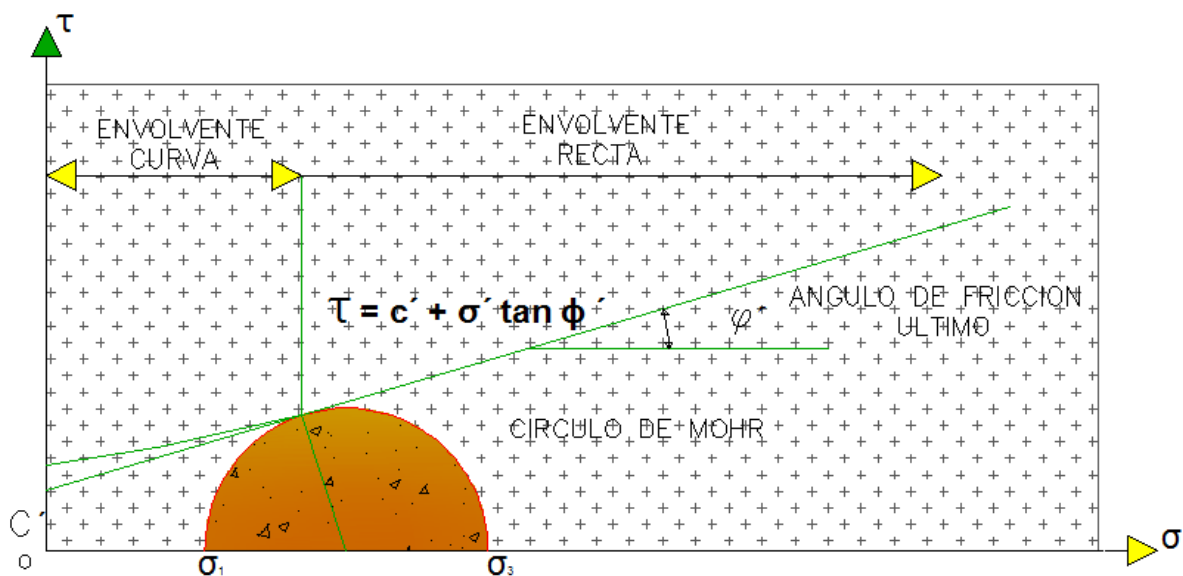


Figura 2. Envolvente de falla y círculo de Mohr. Fuente: Adaptada de: (Suarez, 1998, p. 85).

Como podemos observar la envolvente es una línea recta, donde la fricción es el ángulo de la pendiente de la línea recta y la cohesión la ordenada en el origen.

Debemos aclarar que debido a los diversos procesos y laboratorios realizados para obtener un estimativo de esta, es muy propenso a la incertidumbre y por eso consideramos que es



inadecuado trabajar los parámetros como constantes, por eso enfocamos el proyecto en un análisis por medio de un método no determinístico.

Continuando con lo anterior, a la hora de analizar un talud, es indispensable definir el factor de seguridad, el cual se calcula por medio de los diferentes métodos desarrollados en el siglo XX, “La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficies” (Suarez, 1998, p. 123). Con esta premisa, ahora podremos introducirnos en los métodos de cálculo para evaluar la estabilidad de un talud, cabe resaltar que se le dará mayor relevancia a algunos de los métodos de cálculo incluidos en el programa SLOPE/W®.

### 2.3.4 Métodos de cálculo.

**2.3.4.1 Método Ordinario o de Fellenius.** Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad (Suarez, 1998, p. 131).

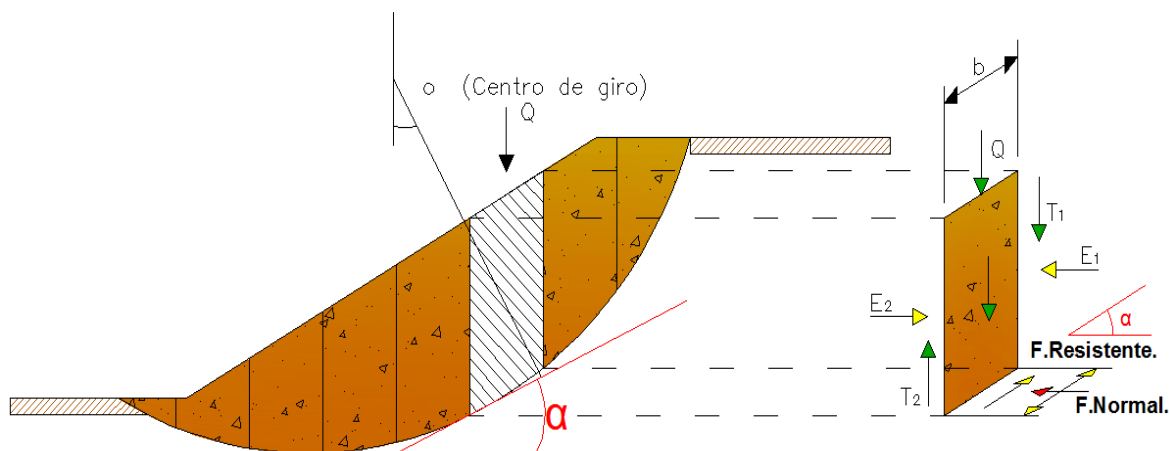


Figura 3. Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas. Fuente: Adaptada de:

(Suarez, 1998, p. 131).

Dónde las fuerzas que actúan son:

El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.

Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.

Las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos de análisis más detallados. El método de Fellenius calcula el Factor de seguridad con la siguiente expresión:

$$F. S. = \frac{\sum[C'b\sec\alpha + (w\cos\alpha - ub\sec\alpha)\tan\phi]}{\sum w\sec\alpha} \quad (4)$$

Dónde:

$\alpha$  = Angulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

W = Peso total de cada tajada.

u = Presión de poros =  $\gamma w \times h w$ .

b = Ancho de la tajada.

C',  $\phi$  = Parámetros de resistencia del suelo.

(Suarez, 1998, pág. 131)

**2.3.4.2 Método de Bishop.** Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas. La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo a la expresión:

$$F. S. = \frac{\sum[C' b + (w - ub)\tan\phi/ma]}{\sum w\sec\alpha} \quad (5)$$

Dónde:

$$ma = \cos\alpha \left( 1 + \frac{\tan\alpha \tan\phi}{FS} \right) \quad (6)$$

b = Ancho de la Dovela.

W = Peso de cada dovela.

C',  $\phi$  = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela =  $\gamma w \times h w$ .

$\alpha$  = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

**2.3.4.3 Método de Janbu.** Janbu (1973) presenta un método de Dovelas para superficies de falla curvas, no circulares. De acuerdo con Janbu (ecuación modificada):

$$F. S. = \frac{f \circ \sum \{ [C' b + (w - ub)\tan\phi] \frac{1}{\cos\alpha ma} \}}{\sum w\sec\alpha} \quad (7)$$

Donde  $f_0$  depende de la curvatura de la superficie de falla (figura 5.), que a su vez depende de la relación de  $(d/L)$  (Suarez, 1998, p. 132).

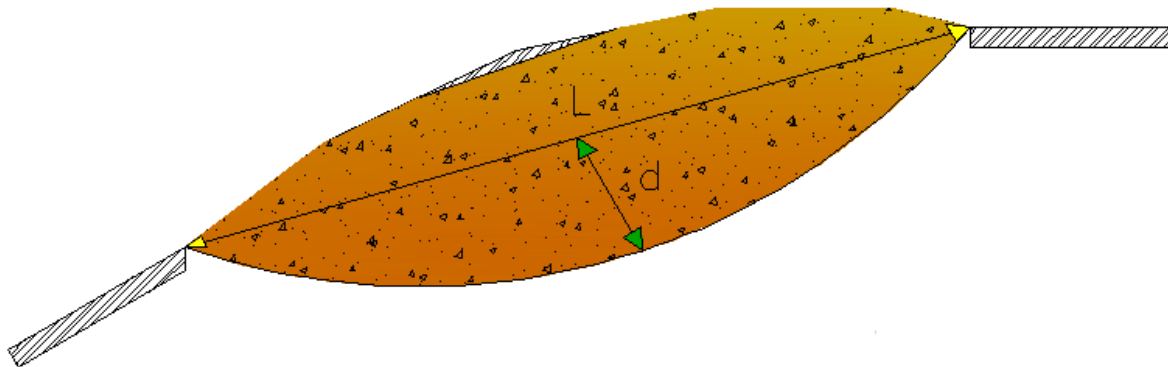


Figura 4. Esquema de relación  $(d/L)$ . Fuente: Adaptada de: (Suarez, 1998, p. 132).

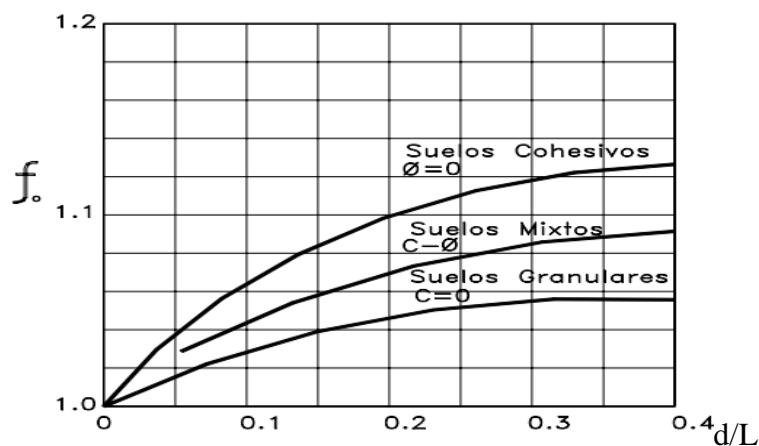


Figura 5. Diagrama para determinar el factor  $f_0$  para el método de Janbú. Fuente: Adaptada de (Suarez, 1998, p. 132).

**2.3.4.4 Método Morgenstern-Price.** Morgenstern y Price (1965) propusieron un método que satisface el equilibrio estático de fuerzas y momentos en forma rigurosa. Considera que la fuerza resultante entre dovelas varía con respecto a un porcentaje de una función arbitraria y por una constante  $\lambda$ . Estos factores permiten utilizar superficies de falla curvas que no necesariamente sean cilíndricas.

Las ecuaciones (8) y (9) presentan el cálculo del factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas y de momentos, respectivamente (Montoya Orozco, 2009, p. 25).

$$F.S.m. = \frac{\sum[C' \beta + (N - uL)R \tan \phi]}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (8)$$

$$F.S.f. = \frac{\sum[C' \beta + (N - u) \tan \phi \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \alpha} \quad (9)$$

Dónde:

F.S.m: factor de seguridad con respecto al equilibrio de momentos.

F.S.f: factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas.

$C'$ ,  $\phi$ = Parámetros de resistencia del suelo.

$\beta$ : longitud de la superficie de falla.

W: peso de la dovela.

$\alpha$ : inclinación de la superficie de falla.

N: fuerza normal entre dovelas.

X: fuerza tangencial entre dovelas.

**2.3.4.5 Método de Spencer.** Este método es uno de los considerados rigurosos. Debido a que supone que la interacción entre rebanadas actúa como una componente de empuje con un ángulo ( $\theta$ ) de inclinación constante, por lo que, mediante iteraciones, se analiza tanto el equilibrio de momentos como de fuerzas en función a ese ángulo ( $\theta$ ), hasta hacerlo converger hacia un mismo valor, calculando entonces el FS correspondiente. Es aplicable tanto a superficies de fallas circulares como generales. La Figura 6. Ilustra esta metodología (Montoya Orozco, 2009, p. 30).

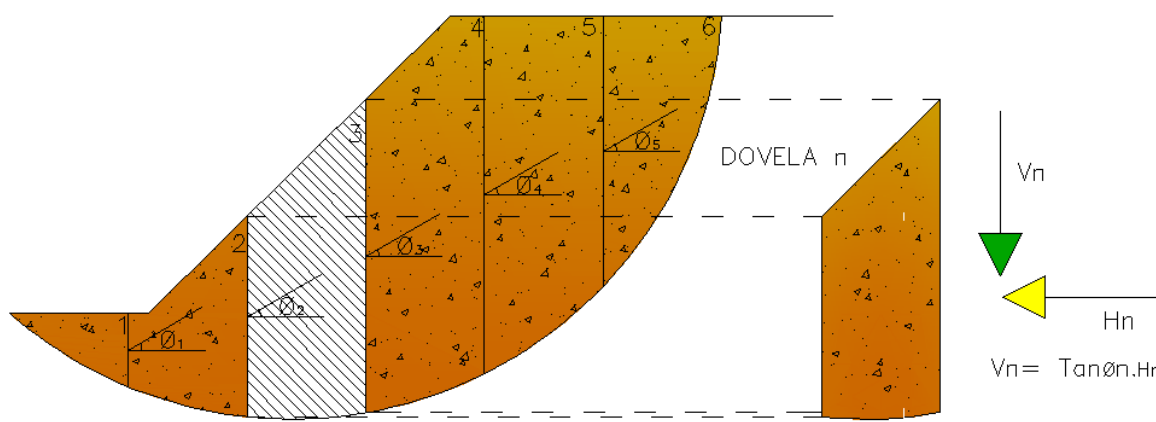


Figura 6. Esquema del método de Spencer. Fuente: Adaptada de (Ale Vélez, J. D. 2011, p. 24).

**2.3.5 Tipos de falla.** Ya conociendo algunas de las diferentes metodologías cálculo de taludes es importante diferenciar las superficies de falla que se pueden presentar en los

diferentes deslizamientos, debido a que este criterio se tiene en cuenta a la hora de realizar su análisis y además está incorporado en las condiciones previas de los modelos del programa SLOPE/W<sup>®</sup>, entonces se considera que la superficie de falla se forma cuando en la zona de su futuro desarrollo actúan esfuerzos cortantes que sobrepasan la resistencia al corte del material; a consecuencia de ello sobreviene la ruptura del mismo, con la formación de una superficie de deslizamiento a lo largo de la cual se produce la falla. Estos fenómenos se los denomina “deslizamientos de tierras” y puede estudiarse dos tipos bien diferenciados (De Matteis, 2003, p. 8).

**2.3.5.1 Falla Rotacional.** En el primer lugar se define una superficie de falla curva, a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud. Esta superficie forma una traza con el plano del papel que puede asimilarse, por facilidad y sin mayor error a una circunferencia, aunque pueden existir formas algo diferentes, en la que por lo general influye la secuencia geológica local, el perfil estratigráfico y la naturaleza de los materiales, estas fallas son llamadas de rotación (De Matteis, 2003, p. 9).

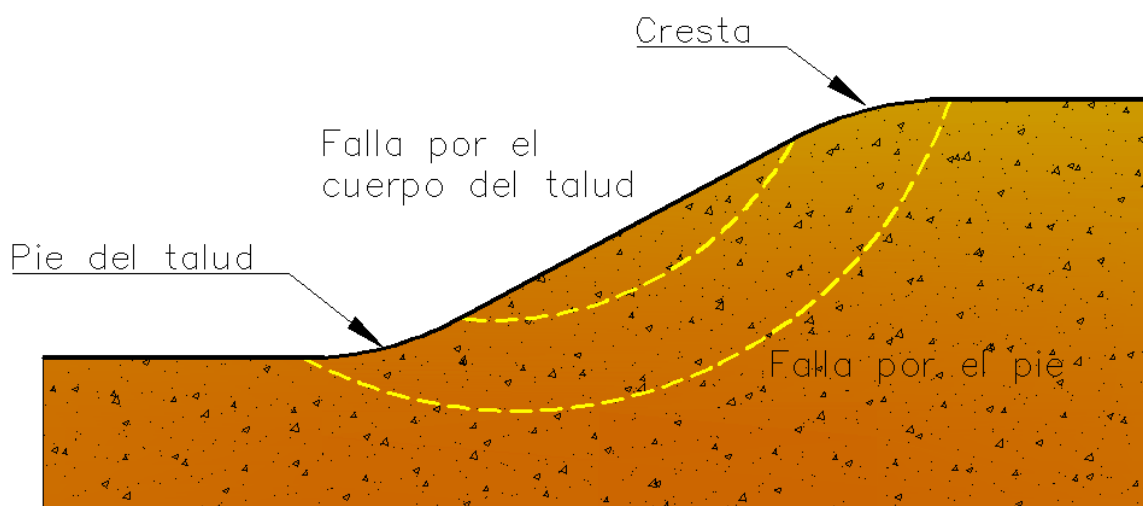


Figura 7. Falla Rotacional. Fuente: Adaptado de: (De Matteis, 2003, p. 8).

**2.3.5.2 Falla Traslacional.** Estas fallas por lo general consisten en movimientos traslacionales importantes del cuerpo del talud sobre superficies de falla básicamente planas, asociadas a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad del talud. La superficie de falla se desarrolla en forma paralela al estrato

débil y se remata en sus extremos con superficies curvas que llegan al exterior formando agrietamientos (De Matteis, 2003, pág. 9).

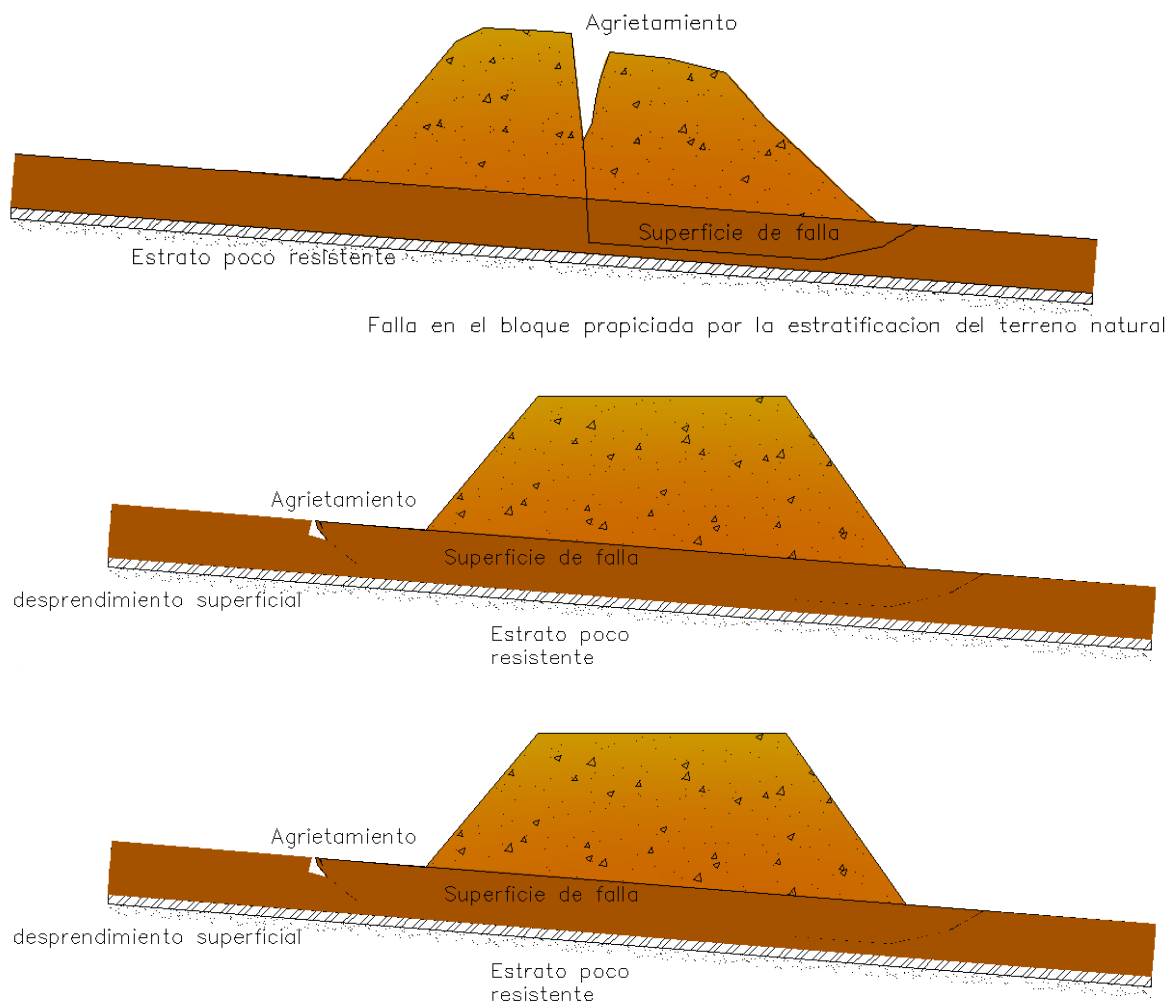


Figura 8. Fallas Traslacionales. Fuente: Adaptado de: (De Matteis, 2003, p. 9).

Con estas teorías de falla, así como con los métodos de cálculo en la estabilidad de taludes tendremos toda la información necesaria para realizar su respectivo análisis, sin embargo todos estos métodos mencionados anteriormente giran en torno a un factor determinístico que se supone constante, entonces cabe aclarar que es importante establecer una probabilidad de falla relacionado a este factor, debido a que en muchos proyectos de ingeniería resultan afectados los

taludes al producirse modificaciones, por tal manera se ve necesario incluir esta variabilidad dentro de los cálculos de modo que el análisis no se basara en un factor determinístico y constante, sino que se analizara desde un punto de vista probabilístico, en donde la posible variación de los parámetros nos creara diferentes probabilidades de falla y estaremos regidos por la que nos genere un menor índice de confianza.

Todo esto es posible porque los parámetros del modelo presentan variabilidad espacial, debido a que hay factores externos como la lluvia e interperísmos que hacen que un talud sea un sistema dinámico por lo tanto, en pro de reducir la incertidumbre, “se tiene la intención de obtener una probabilidad de falla en función de los valores de los parámetros resistentes, la configuración geométrica, posición del nivel freático, etc, teniendo en cuenta la distribución de sus valores” (López Pineda, G. Correo electrónico, 08 de septiembre de 2015).

Para lograr lo anterior se calcula la relación entre las fuerzas o momentos resistentes y las fuerzas o momentos actuantes obteniendo un factor seguridad que está afectado por las incertidumbres de los parámetros que le dieron origen, por lo cual, a todo factor de seguridad intrínsecamente va ligado un grado de incertidumbre.

**2.3.6 Incertidumbre en la geotecnia.** Baecher & Christian (2003), citados por los ingenieros Cesar Hidalgo y André Assis (2011), clasifican la incertidumbre en la ingeniería geotécnica en tres grandes categorías: variabilidad natural, incertidumbre en el conocimiento e incertidumbre en los modelos de decisión.

**2.3.6.1 La variabilidad natural.** Está asociada con la aleatoriedad inherente a los procesos naturales, manifestándose como variabilidad en el tiempo para fenómenos que toman lugar en un único lugar (variación temporal), o variabilidad en el espacio para eventos que se producen en diferentes lugares al mismo tiempo (variación espacial), o variaciones tanto en el espacio como en el tiempo.

Esta variabilidad natural se aproxima usando modelos matemáticos simplificados o modelos físicos, los cuales solo proporcionan una aproximación al fenómeno natural en el mejor de los casos.

**2.3.6.2 La incertidumbre en el conocimiento.** Es atribuida a la carencia de datos, ausencia de información acerca de eventos y procesos, o a la falta de entendimiento de las leyes físicas que limitan la habilidad para modelar el mundo real. En ocasiones, esta incertidumbre puede ser llamada también epistémica, subjetiva o interna.

**2.3.6.3 Aplicaciones geotécnicas.** La incertidumbre en el conocimiento se puede dividir en tres subcategorías: incertidumbre en la caracterización del sitio, incertidumbre en los modelos e incertidumbre en los parámetros.

**2.3.6.3.1 La incertidumbre en la caracterización del sitio.** Depende de la adecuada interpretación que se hace de la geología subsuperficial. Esto resulta de la incertidumbre de los datos y de la exploración, incluyendo errores de medición; inconsistencia y heterogeneidad de los datos; manipulación de los datos y errores de transcripción; e inadecuada representatividad del muestreo debido a limitaciones de tiempo y espacio. Otro factor que se debe considerar está relacionado con las limitaciones económicas a la hora de realizar la exploración y el muestreo.

**2.3.6.3.2 La incertidumbre de los modelos.** Depende del nivel de precisión con que el modelo matemático escogido representa la realidad. Esta incertidumbre, refleja la inhabilidad de un modelo o técnica de diseño para representar precisamente el verdadero comportamiento físico del sistema, o la inhabilidad del diseñador para identificar el mejor modelo.

**2.3.6.3.3 La incertidumbre en los parámetros.** Depende de la precisión con que los parámetros del modelo pueden ser estimados. Resulta de la inexactitud en la determinación de los valores de los parámetros a partir de ensayos o calibración de datos, y es exacerbado por el número limitado de observaciones, resultando en imprecisión estadística.

Parámetros del suelo. En cuanto a la obtención de parámetros del suelo se pueden destacar las siguientes fuentes de incertidumbre:

Error estadístico debido a la cantidad insuficiente de ensayos, de mediciones piezométricas, etc.

Datos tendenciosos (sesgos), que son aspectos del comportamiento real persistentemente alterados por los ensayos, resultados de instrumentación etc.



Errores de ensayo (ruidos), son aquellos asociados a la precisión de calibración y mediciones, la exactitud de las lecturas etc.

Variabilidad espacial (natural o inherente) de los parámetros, que es la diferencia real de características del comportamiento debidas a diferencias de composición, meteorización e historia de tensiones entre un punto y otro. Los dos primeros aspectos analizados contribuyen lo que se denomina error sistemático, que actúa independiente de la posición o del tamaño del volumen de análisis o superficie de falla, y afecta principalmente la media.

La variabilidad de los parámetros geotécnicos que tienen influencia en los procesos de análisis de riesgo por deslizamiento puede ser manejada mediante técnicas estadísticas y probabilísticas.

Según el USACE (1999) los valores de los momentos probabilísticos pueden ser estimados de varias formas entre las cuales se pueden citar:

- Análisis estadísticos de determinaciones en ensayos del parámetro deseado.
- Ensayos índice que pueden ser correlacionados con el parámetro deseado.
- Basados en criterio y experiencia cuando no hay datos disponibles.

Estas dos últimas opciones tienen que ser evaluadas con mucho cuidado ya que el nivel de incertidumbre se incrementa gradualmente desde el primero hacia los últimos. En el caso de análisis de confiabilidad, la utilización de correlaciones o datos definidos por la experiencia el problema puede ser enfrentado asumiendo coeficiente de variación mayor que en el caso de los datos medidos directamente.

**2.3.6.4 Evaluación de incertidumbre.** Una forma de evaluar la incertidumbre es mediante los análisis por confiabilidad. Ésta se puede entender como la posibilidad que tiene un sistema para realizar las funciones para las que fue concebido. Por otro lado, una falla es todo comportamiento que se pueda considerar anómalo. Actualmente, es común expresar la confiabilidad en la forma de un índice de confiabilidad, que se relaciona con una probabilidad de falla. Se puede entender en este contexto que la falla incluye no solamente fallas catastróficas sino cualquier diferencia inaceptable entre el comportamiento esperado y el observado.

Los análisis de confiabilidad, tratan de la relación entre las cargas que un sistema puede sufrir y la capacidad que éste tiene para soportarlas. En geotecnia tanto las cargas como la resistencia son inciertas, por lo tanto el resultado de esta interacción también es incierto.

Ahora bien los Métodos probabilísticos son aquellos que permiten la evaluación de la distribución de probabilidades de una variable dependiente en función del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes que la generan. existen diversos

métodos probabilísticos, pero en el presente trabajo, solo se menciona el método Montecarlo debido a que es una de las herramientas universalmente más conocidas y utilizadas, además está involucrado directamente el software SLOPE/W®.

**2.3.7 Probabilidad.** Buscando describir y cuantificar la heterogeneidad que presentan los suelos en sus propiedades índices y mecánicas se han utilizado conceptos propios de la probabilidad y la estadística, con el objetivo de generar un modelo representativo de estos suelos que se aplica en los análisis geotécnicos de interés. La probabilidad considera el problema de un experimento que origina varios resultados. A la lista de resultados posibles y mutuamente excluyentes de un experimento se le conoce como espacio de muestra; con lo anterior, se considera a un evento como cualquier subconjunto del espacio de muestra (Montoya Orozco, 2009, p. 34).

Los valores del espacio muestra son evaluados por métodos probabilísticos los cuales se basan en ciertos parámetros de probabilidad, los cuales el ingeniero G. López Pineda menciona en su manual para análisis probabilístico con el software Slope/W 2007 (G. López Pineda, correo electrónico, 08 de septiembre de 2015):

**2.3.7.1 Valor de la media aritmética.** Es la suma de todos los valores de la variable dividida entre el número total de elementos.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_{n-1} + X_n}{n} \quad (10)$$

Si el valor  $x_i$  de la variable  $X$  se repite  $n_i$  veces, aparece en la expresión de la media aritmética de la forma:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i n_i}{n} \quad (11)$$

También es posible en lugar de usar valores de repetición usar las frecuencias de aparición de la cada uno de los valores del parámetro.

**2.3.7.2 Valor de la desviación Estándar.** La desviación estándar es un índice numérico de la dispersión de un conjunto de datos (o población). Mientras mayor es la desviación estándar, mayor es la dispersión de la población. La desviación estándar es un promedio de las desviaciones individuales de cada observación con respecto a la media de una distribución. Así, la desviación estándar mide el grado de dispersión o variabilidad. En primer lugar, midiendo la diferencia entre cada valor del conjunto de datos y la media del conjunto de datos.

La expresión de la desviación estándar es:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (12)$$

Siendo:

$x_i$ : los valores de la distribución del parámetro.

$\bar{x}$ : valor de la media.

$n$ : número total de datos.

**2.3.7.3 Coeficiente de variación.** El coeficiente de variación es una medida de dispersión que describe la cantidad de variabilidad en relación con la media. Puesto que el coeficiente de variación no se basa en unidades, se puede utilizar en lugar de la desviación

estándar para comparar la dispersión de los conjuntos de datos que tienen diferentes unidades o diferentes medias.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \quad (13)$$

Donde:

CV: coeficiente de variación

S: desviación estándar

$\bar{x}$ : media aritmética

**2.3.8 El método de Monte Carlo.** Como veníamos diciendo, uno de los métodos probabilísticos con los cuales se realizan los análisis de probabilidad en estabilidad de taludes es el método de Montecarlo, que es una metodología que permite determinar la función de distribución de frecuencia de la variable dependiente analizada mediante la generación de números aleatorios uniformes que representan las variables independientes envueltas.

Considera este método que la variable dependiente estudiada presenta una función  $Y=f(X1, X2...Xn)$  y que son conocidas las distribuciones de probabilidad de las variables  $X1, Xn$ . Son atribuidos valores de frecuencia a valores aleatorios de las variables  $X1, X2...Xn$  y se evalúa la función  $Y$  para estos valores. El proceso se repite de forma iterativa tantas veces como sea necesario para conseguir la convergencia de la distribución de probabilidad.

La principal aplicación de la técnica de Monte Carlo está en la aproximación de la función de probabilidad para una o más variables aleatorias. La simulación de Monte Carlo requiere una capacidad alta en los cálculos, para la generación de una amplia gama de números. A partir del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes, valores de estas variables podrían ser obtenidos por medio de un generador de números aleatorios y valores de la variable independiente ser calculados a partir de estos. Se puede decir que cuando este proceso sea repetido  $N$  veces, la distribución de probabilidad (forma y magnitud) de la variable dependiente sería obtenida, para (1- % de confianza). A partir de esta distribución, sus parámetros estadísticos tales como media, varianza, probabilidades acumuladas etc., podrían ser calculados (Cesar Hidalgo y André Assis, 2011).

## 2.4 Marco legal

La base jurídica que conforma el soporte legal del proyecto, por el cual está regido y restringido, está basado en la siguiente normatividad:

Constitución colombiana de 1991.

Art.3 Decreto 4147 de 2011, por el cual Por el cual se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, se establece su objeto y estructura.

Ley 1523 del 24 de abril del 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

Decreto 173 del 23 de julio de 2012. Adopta el Plan Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres para implementarse en el municipio de Ocaña para trabajar sobre la Gestión del Riesgo y Desastre.

Decreto 1807 del 19 de septiembre del 2014, "Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones"

Reglamento Colombiano de construcción sismoresistentes (NSR-10). Título H, Estudios Geotécnicos.

Reglamento de la Universidad Francisco de Paula Santander.

### **3. Diseño metodológico**

#### **3.1 Tipo de investigación**

La investigación que se desarrollará en el presente proyecto será de tipo descriptiva y cuantitativa. Debido a que los datos recolectados de las modelaciones creadas usando el software SLOPE/W<sup>®</sup> permitirán el análisis cuantitativo de éstos, con el fin de generar una cartilla de ábacos que describirán las variaciones que tendrá el Factor de Seguridad dependiendo de los parámetros inherentes en la estabilidad de taludes.

#### **3.2 Población**

Debido a que se realizara un estudio de forma general, la población será todo aquel talud o ladera presente en cualquier lugar del mundo.

#### **3.3 Muestra**

En la presente investigación se considera como muestra, todo talud o ladera siempre que sus parámetros que definen su propia estabilidad, se encuentren entre los rangos de las variaciones evaluadas y descritas a continuación.

### **3.3.1. Parámetros geomorfológicos.**

**3.3.1.1 *Estratigrafía del talud.*** Se considerara un solo estrato en las modelaciones desarrolladas en esta investigación.

**3.3.1.2 *Altura del talud.*** El rango determinado para la altura del talud será desde los 3 metros hasta los 12 metros, variando en cada modelo 1 metro.

**3.3.1.3 *Angulo de inclinación del talud.*** Se tomará desde los 90 grados hasta los 45 grados con intervalos de 5 grados.

**3.3.1.4 *Altura del nivel freático.*** En un inicio, no se introducirá, pero luego se pondrá en ascenso, desde el pie del talud, hasta la corona del talud, esta ascensión cada 0,5 metros.

**3.3.1.5 *Peso específico del suelo.*** Este se variara desde los 16 kN/m<sup>3</sup> hasta 22 kN/m<sup>3</sup>, este rango se determinó por ser considerado por algunos autores como una gama de los posibles valores de un suelo ligeramente débil hasta uno con una capacidad portante considerable.

### 3.3.2 Parámetros de resistencia del suelo.

**3.3.2.1 Cohesión.** Se variara desde 0 hasta los 40 kPa, con márgenes de 1 kPa.

**3.3.2.2 Angulo de fricción.** Se variara desde los 10 hasta los 35 grados, con variaciones de 0.5 grado para cada modelo.

**3.3.3 Cargas.** Se considerara una carga uniformemente distribuida en todos los modelos, con un peso equivalente a una vivienda unifamiliar de dos niveles, la cual por medio de los lineamientos de la norma de construcción colombiana NSR-10 se estableció en 12.6 KN, basados en estudios realizados por el grupo de investigación GIGMA y que se describe en la siguiente tabla.

**Tabla 1**

*Consideraciones de carga a introducir en los modelos*

Niveles	Ancho	Largo	Área	Área total	Carga KN	Carga KN/M <sup>2</sup>
2	6.7	13.15	88.1	176.21	1110.23	12.6

**Nota.** La tabla presenta las consideraciones que se utilizaron para calcular la carga que se ingresara en los modelos de estudio, a través del software slope/w. Fuente: grupo de investigación en geotecnia y medio ambiente (2014)



### **3.4 Técnicas de recolección de información**

Las técnicas de recolección de información para crear el presente proyecto, serán fuentes primarias y secundarias, así como el uso del internet, luego se introducirá en el uso del software SLOPE/W<sup>®</sup> con el cual se realizaran los modelos de donde se obtendrán los datos necesarios para la creación de la cartilla de ábacos.

### **3.5 Proceso metodológico**

Los diferentes procedimientos básicos para la realización de este proyecto se enfocan en el desarrollo de la siguiente de la estructura, primeramente la documentación y revisión del estado del arte, luego se debe establecer el alcance del proyecto en cuanto a la variación de los parámetros, también se debe manejar satisfactoriamente el programa SLOPE/W<sup>®</sup> y después se empezara con las diferentes modelaciones, que son las que nos permitirán generar los análisis probabilísticos y de sensibilidad, para más tarde reunir una gran base de datos, en donde se clasificara la información, y luego con ayuda de la herramienta informática Excel se crearan los ábacos que son las herramientas generadas por la investigación y con esto realizar su respectivo análisis y contribuciones.

## 4. Definición de los resultados

### 4.1 Realizar un análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes haciendo uso del software SLOPE/W®.

Para cumplir con los objetivos planteados en el presente proyecto mediante los análisis probabilísticos y de sensibilidad a través del software SLOPE/W® y poder crear la cartilla de ábacos en donde se representa la variación del factor de seguridad en función de los parámetros inherentes en la estabilidad de taludes, además asociarlo con su respectiva probabilidad de falla representada a través de tablas en Excel de fácil acceso y Crear un manual para dichos análisis, fue necesario como primera medida definir una estructura básica por etapas para poder desarrollarlos, que se muestra a continuación:

**4.1.1 Recolección de información.** Antes de poder entrar a recolectar la base de datos fundamental para realizar los análisis. Es necesario definir Los parámetros para enmarcar el alcance del proyecto tales como las propiedades generales de los modelos que son requisito a ingresar en el software SLOPE/W®.

Entonces, Para observar como varia el factor de seguridad dentro de los suelos de la región de Ocaña, se realizaron los análisis con las delimitaciones mencionadas anteriormente en dos materiales característicos de la formación algodonala y que dentro del desarrollo del proyecto se optó por considerar un modelo con material de características de un suelo cohesivo clasificado

como CL (arcilla de baja plasticidad) y otro con características de un suelo friccionante clasificado como SC (arena arcillosa), estas clasificaciones basadas en el sistema unificado de suelos (S.U.C.S).

Las propiedades de los suelos en mención se extrajeron de ensayos hechos en diferentes proyectos realizados en la formación algodonal, precisamente en la zona urbana del municipio de Ocaña, Norte de Santander, Colombia.

Para generar los análisis de probabilidad y de sensibilidad a través del programa SLOPE/W<sup>®</sup>, es necesario incluir parámetros de entrada para desarrollar los modelos, estos parámetros básicos se describen a continuación así como su fuente y origen:

**4.1.1.1 Suelo cohesivo de la formación algodonal.** Las propiedades principales de este material, se extrajeron de ensayos de laboratorio realizados en el proyecto de grado de Ingeniería civil de la Universidad Francisco De Paula Santander seccional Ocaña titulado: “Estudio de estabilidad de un talud ubicado en el barrio bellavista del municipio de Ocaña, Norte de Santander”. Realizado por los ingenieros Jesús Alfonso Conde Garzón y Jennifer Álvarez Prada (2014, p.71) El talud de estudio estaba conformado por siete estratos diferentes, dentro de los cuales se encontraba uno con características predominantes de las arcillas de la formación algodonal, más específicamente el estrato 6, según los ensayos de los autores de dicho proyecto y rigiéndose por la clasificación unificada de suelos se definió como un suelo CL, que en la siguiente tabla resume sus propiedades básicas.

**Tabla 2***Propiedades de material arcilloso de la formación algodonal*

<b>Estrato</b>	<b>Descripción</b>	<b>P.U gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>%L.L.</b>	<b>%L.P.</b>	<b>%I.P.</b>	<b>%Finos</b>	<b>S.U.C.S</b>	<b>AASHTO</b>	<b>Φ</b>	<b>C</b>
6	Arcilla	2.07	44	17	27	56.1	CL	A-7-6(12)	22.7	19.52

**Nota.** La tabla presenta los valores de las propiedades del estrato 6 del talud ubicado en el barrio Bellavista de la ciudad de Ocaña, en donde se pueden observar valores propios de un suelo arcilloso de la formación algodonal.

**4.1.1.2 Suelo granular de la formación algodonal** Calificado como SC, las propiedades principales de este material, se extrajeron de ensayos de laboratorio realizados en el desarrollo de la investigación publicada por la editorial académica española, en el libro “Inestabilidad de Laderas. Procesos constructivos de Estabilización” realizada por los doctores mexicanos Oscar Andrés Cuanalo, Aldo Onel Oliva Gonzales y por el magister colombiano Romel Gallardo, quienes en su investigación incluyeron un análisis de estabilidad en el barrio Junín.

En el estudio geotécnico se encontró tres estratos que conformaban el talud y su estrato numero 2 está compuesto por suelos friccionantes de la formación algodonal, considerado como un suelo areno arcilloso. Los valores de sus propiedades se describen a continuación.

**Tabla 3***Propiedades de material friccionante de la formación algodonal*

<b>Estrato</b>	<b>Descripción</b>	<b>P.U gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>%L.L.</b>	<b>%L.P.</b>	<b>%I.P.</b>	<b>S.U.C.S</b>	<b>Φ</b>	<b>C</b>
2	arena arcillosa	1.998	42	25.4	16.6	SC	33.9	11.8

**Nota.** La tabla presenta los valores de las propiedades del estrato 2 del talud ubicado en el barrio Junín de la ciudad de Ocaña, en donde se pueden observar valores propios de un suelo areno arcilloso de la formación algodonal.

**4.1.2 Análisis probabilísticos.** Para realizar los análisis probabilísticos a través del programa SLOPE/W<sup>®</sup> es de obligatoriedad introducir el valor de la desviación estándar, que no es constante en los parámetros a evaluar como lo son cohesión, ángulo de fricción y peso específico. En el presente proyecto se utilizó las recomendaciones de la revista “Evaluación de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de un talud excavado en suelos residuales” realizado por el doctor en geotecnia colombiano Cesar Hidalgo y por el PH.D., brasileño André Pacheco de Assis, en el presente proyecto se retoman los valores del coeficiente de variación que ahí se mencionan además con ayuda de la ecuación (13) servirán para definir el valor de la desviación estándar de las variables que se introducirá en el programa.

Tabla 4

Valores típicos del coeficiente de variación

PARÁMETRO	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	FUENTE
Cohesión	20-80	Hidalgo & Assis
Peso Especifico	4-8	USACE 1994
Phi arenas	3.7-9.3	USACE 1994
Phi arcillas	7.5-10.1	USACE 1994

**Nota.** La tabla presenta la recomendación de Hidalgo & Assis para el valor del coeficiente de variación, indispensable para hallar el valor de la desviación estándar, parámetro necesario a introducir en los cálculos probabilísticos.

El coeficiente de variación que se escogió, fue el valor medio de los mencionados en la tabla anterior.

Desviación estándar del peso específico:

$$CV = \frac{S}{x} \rightarrow 0.06 = \frac{S}{19} \rightarrow S = 1.14$$

Desviación estándar de la cohesión:

$$CV = \frac{S}{x} \rightarrow 0.5 = \frac{S}{20} \rightarrow S = 10$$

Desviación estándar del ángulo de fricción en arenas:

$$CV = \frac{S}{x} \rightarrow 0.075 = \frac{S}{22.5} \rightarrow S = 1.46$$

Desviación estándar del ángulo de fricción en arcillas:

$$CV = \frac{S}{x} \rightarrow 0.088 = \frac{S}{22.5} \rightarrow S = 1.98$$

Con la obtención de estos datos se culmina la recolección de los valores necesarios a ingresar en el software para realizar los análisis probabilísticos y por lo tanto se inició con la creación de los modelos de donde se generaran las bases de datos.

**4.1.3 Análisis de sensibilidad.** Teniendo claro los parámetros de resistencia así como su peso específico, y todas las delimitaciones mencionadas anteriormente, conociendo la interfaz gráfica, como el uso del software SLOPE/W<sup>®</sup> y además los factores que afectan los análisis de estabilidad de taludes tendremos suficientes bases para realizar las modelaciones en el software y crear los análisis de sensibilidad.

**4.1.4 Generación de bases de datos.** Para poder garantizar que la variación del factor de seguridad sea fidedigna, se realizó el proyecto con una muestra representativa de 12160 modelos diferentes por medio de SLOPE/W<sup>®</sup> distribuidas de la siguiente manera; 50% de los modelos son con material areno-arcillosa divididas en análisis de sensibilidad y probabilidad, así mismo el otro 50% de modelos con material de arcilla de baja plasticidad divididos en la misma distribución que el material arenoso. Gracias a la interfaz del programa SLOPE/W<sup>®</sup> y su compatibilidad con programas como Excel, se pudo exportar todos los datos generados, por los análisis realizados y se clasificaron principalmente por su material, luego por su ángulo de inclinación, también por su altura y después por la ascensión del nivel freático esto a su vez se realizó para el peso específico, para la cohesión y para el ángulo de fricción.

**4.1.5 Clasificación de la información.** Debido a la gran cantidad de datos fue necesario clasificarla, de acuerdo con la temática, es decir darle relevancia a los modelos que consistentemente son estables, debido a que en el marco del proyecto había incertidumbre respecto a cómo se comportarían los datos, es por eso que por medio de las herramientas que

contiene el programa Excel como lo son los formatos condicionantes; se determinó en que momento el factor de seguridad era menor a 0.85 y se consideró por parte de los autores que estos datos no eran relevantes debido a que con un factor de seguridad menor a 1 se presenta una probabilidad de falla de más del 50 % y se considera que el talud es inestable, o que con las condiciones presentes en la simulación, ya debería haber fallado el modelo de estudio.

**4.1.6 Ordenar información.** Luego de precisar los datos relevantes, fue necesario ordenarlo, de tal manera que tuvieran concordancia a la hora de graficar, para esto se utilizó la herramienta de office Excel, que nos permitirá observar el comportamiento del factor de seguridad ante los análisis de sensibilidad y probabilidad.

**4.1.7 Generación de la cartilla de ábacos.** Debido a que la cantidad de datos es extensa, fue necesario clasificar los ábacos en primer orden por altura de talud que es el parámetro considerado como inmutable, luego se acompaña esta altura con un grado de inclinación del talud y mediante gráficos radiales mostrar la tendencia de las curvas que representan la sensibilidad del factor de seguridad ante las variaciones simultaneas del ángulo de fricción, cohesión, peso específico y altura del nivel freático, dicho valor del factor de seguridad estará asociada a una tabla anexa en donde se mostrara el valor de la probabilidad de falla asociada.



#### **4.2 Hacer uso del análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes variando los parámetros determinísticos del suelo utilizando la simulación Monte-Carlo del software SLOPE/W®.**

El software SLOPE/W® cuenta con características especiales en cuanto al análisis de estabilidad de taludes ya que puede generar análisis no determinísticos mediante el método probabilístico Montecarlo, que es necesario a la hora de realizar los análisis en donde se varían los parámetros geométricos y resistentes del modelo estudio y lo más importante nos asocia el valor del coeficiente de estabilidad a una probabilidad de falla, por lo que nos brinda el nivel de amenaza, además esta herramienta nos permite paralelamente a los análisis de sensibilidad y de probabilidad, encontrar la superficie de falla optimizada.

En el presente proyecto, la falla optimizada se calculó por medio de esta herramienta con un total de 2000 iteraciones por modelo, para dirigir las simulaciones hacia la realidad.

Luego, para desarrollar el presente objetivo hubo la necesidad de adquirir el conocimiento del uso del software así como el llevar a cabo los análisis probabilísticos y de sensibilidad, y visualizar los resultados de cada uno de estos análisis. Después se crearon los 12160 modelos en SLOPE/W® con las respectivas características para cada simulación, mencionadas en el numeral 4.1. Los modelos se pueden observar en el [Apéndice D](#) de este proyecto.

Continuando con lo anterior, con ayuda del gestor de solución de los modelos incorporado en SLOPE/W<sup>®</sup>, se resolvieron los modelos para obtener los resultados. La obtención de estos datos se realizó exportándolos desde SLOPE/W<sup>®</sup> hasta el software Microsoft Excel, para posteriormente organizar los datos, generando una vasta base de datos de factores de seguridad y así finalizar este objetivo. La base de datos generada se puede apreciar en el [Apéndice E](#) de este trabajo.

#### **4.3 Elaborar ábacos en donde se represente la variación del factor de seguridad y la probabilidad de falla, en función de los diferentes parámetros que afectan directamente la estabilidad de taludes.**

Después de haber realizado los análisis probabilísticos y de sensibilidad, además obtener la base de datos de factores de seguridad y probabilidades de falla, que es información netamente cuantitativa y su mejor manera de representar es por medio de gráficos o tablas que reúnan organizadamente esta información. Debido a esto, los datos correspondientes al análisis de sensibilidad se representaron por medio de ábacos y los datos respectivos al análisis probabilístico se mostraron por tablas de Microsoft Excel para facilitar la búsqueda de las probabilidades de falla, debido a la gran cantidad de datos que este análisis arroja.

Luego, se clasificó la información utilizando la función de los formatos condicionales de las hojas de cálculo de Microsoft Excel, en donde identificamos los factores de seguridad mayores a 0.85 tomando este valor como el límite inferior de nuestros ábacos. Teniendo en cuenta que el factor de seguridad igual a uno (1) representa el instante donde las fuerzas actuantes y resistentes

son iguales, y por lo tanto un valor menor a este representa inestabilidad, pero no se tomó uno (1) como límite inferior para poder ilustrar en los ábacos la convergencia de la inestabilidad en los modelos.

Después de lo anterior, se procedió a buscar las opciones de graficar esa gran cantidad de datos, para esto vimos la necesidad de convertir los rangos de valores de los parámetros del análisis de sensibilidad: ángulo de fricción, cohesión y peso específico, a una misma unidad para poder agruparlos en una sola representación gráfica. Esto se logró tomando como ejemplo la conversión del rango utilizada por el software SLOPE/W<sup>®</sup>, la cual modifica el rango transformando el valor mínimo en cero (0) por ciento y el valor máximo en cien (100) por ciento, en la tabla 5 se muestra nuevamente el rango normal y el modificado para cada parámetro:

Tabla 5

Valores de los rangos modificados de los parámetros.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>RANGO DE VARIACIÓN</b>	<b>RANGO MODIFICADO</b>
Ángulo de Fricción	10° a 35°	0 - 1
Cohesión	0 kPa a 40 kPa	0 - 1
Peso Especifico	16 kN/m <sup>2</sup> a 22 kN/m <sup>2</sup>	0 - 1

**Nota.** La tabla presenta los valores de sensibilidad de los rangos mínimos y máximos de los parámetros a introducir en los ábacos.

Continuando con lo anterior, la modificación del rango se realizó con las siguientes formulas:

Para el ángulo de fricción:

$$Rv\phi = \frac{1}{25} * (\phi - 10) \quad (14)$$

Para la cohesión:

$$RvC = \frac{1}{40} * C \quad (15)$$

Para el peso específico:

$$RvPe = \frac{1}{6} * (Pe - 16) \quad (16)$$

*Donde:*

$\phi$ : Valor del ángulo de fricción en grados.

C: Valor de la cohesión en kPa.

Pe: Valor del peso específico en kN/m<sup>3</sup>.

Luego de esto, se organizaron las hojas de cálculo para facilitar la representación gráfica de los datos y empezar a hacer las pruebas para encontrar la gráfica adecuada que permitiera la correcta interpretación de esta. Lo primero que notamos fue que no se podía representar toda la información en un solo ábaco debido a la magnitud de esta y no permitiría la interpretación correcta de los datos.

La decisión del grafico correcto para los ábacos se tomó luego de observar todas las opciones de gráficos incluidas dentro de Microsoft Excel y encontrar que el tipo de grafico radial era el óptimo para representar las variaciones del factor de seguridad, debido a que se pudo agrupar cuatro de las seis variables planteadas en esta investigación, estas son ángulo de fricción,

cohesión, peso específico y altura de nivel freático, en la siguiente figura podremos apreciar el gráfico radial y su distribución. Las hojas de cálculo donde están las gráficas se pueden observar en el [Apéndice F](#).

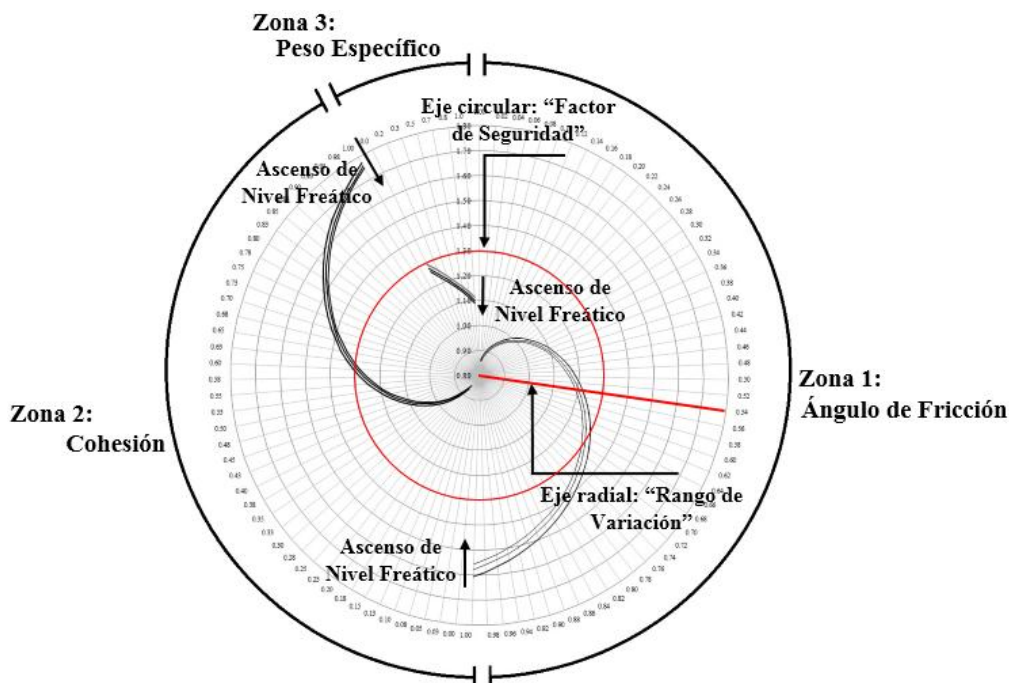


Figura 9. Distribución del gráfico radial. Fuente: Autores del proyecto.

Como se pudo observar en la imagen anterior los ábacos se dividen en cuatro zonas, zona 1: ángulo de fricción, zona 2: cohesión, zona 3: peso específico y la cuarta zona que son las curvas de datos que forman las diferentes alturas de nivel freático para un mismo modelo, cada una de estas equivale a 0.5 metros más que la anterior, donde la primera desde el borde de la gráfica representa la curva de valores sin nivel freático.

Además la cartilla de ábacos se clasifica principalmente por su material ya sea SC (arena arcillosa) o CL (arcilla de baja plasticidad), luego por su altura debido a que es el parámetro que

generalmente se mantiene constante. No se pudo incluir en estos ábacos la sensibilidad correspondiente a la inclinación del talud, debido a la gran extensión de datos a introducir en las series de los ábacos, los cuales saturarían los gráficos y no permitirían la correcta interpretación de sus resultados, por esta razón la tercera clasificación característica de los ábacos es su ángulo de inclinación. Para observar los ábacos diríjase al [apéndice B](#) de este proyecto.

Entonces cada ábaco de la cartilla se caracteriza por poseer tres datos de entrada los cuales son: tipo de material, altura y ángulo de inclinación, quienes son únicos en la cartilla, luego dentro del ábaco se observa como varía el factor de seguridad respecto al peso específico, ángulo de fricción y la cohesión, para los diferentes niveles freáticos presentes en el modelo de estudio, que como se mencionó anteriormente se variarían desde el pie hasta la cabeza del talud, variando esta ascensión cada 0,5 metros.

Para entender completamente lo mencionado en los últimos párrafos a continuación se muestra la representación del ábaco para el material CL, una altura de 12 metros y un ángulo de inclinación igual a 45 grados y brevemente se explica el cómo ingresar en esta gráfica.

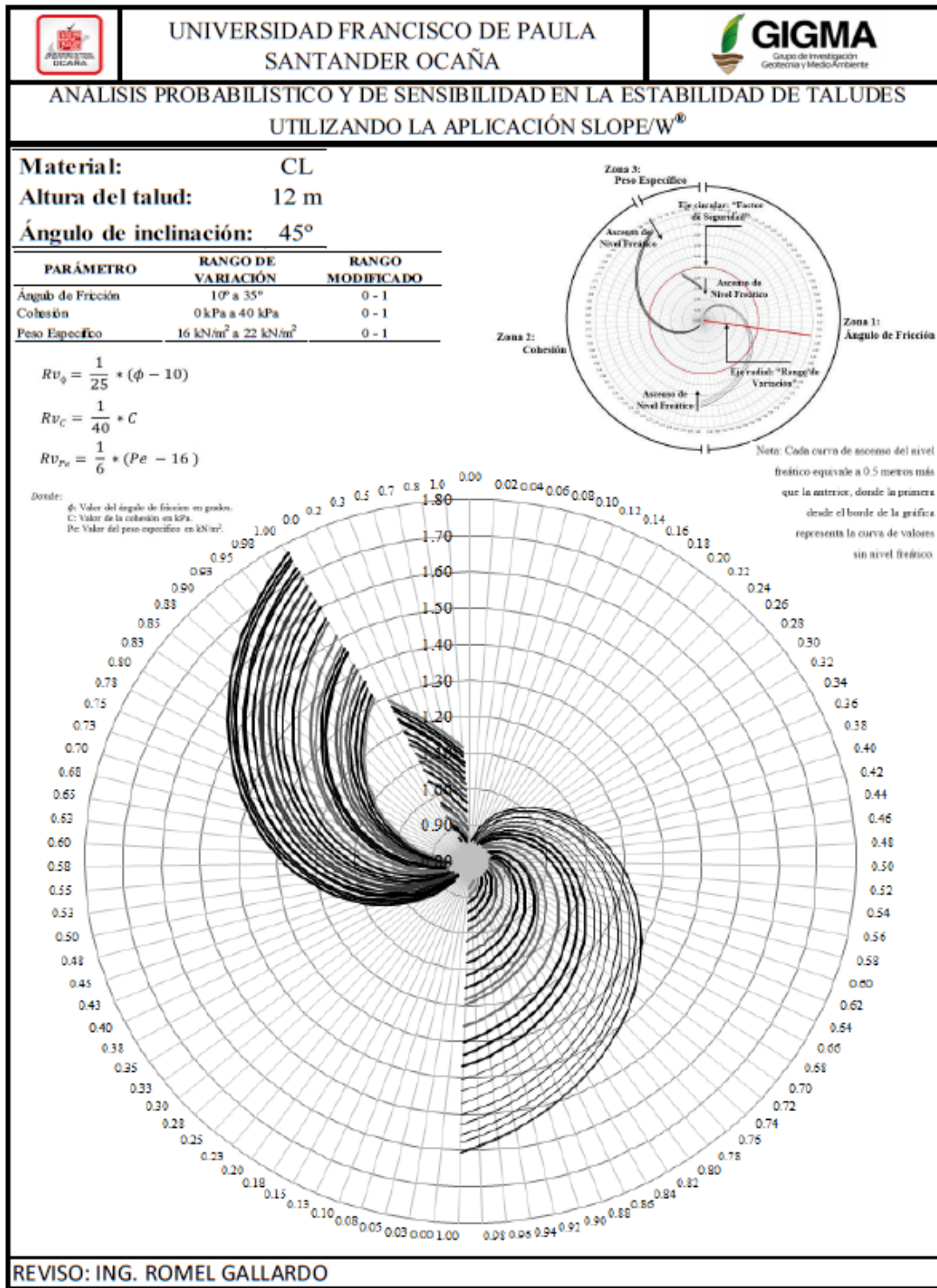


Figura 10. Ábaco CL-H=12-B=45. Fuente: Autores del proyecto.

Como se mencionó, la figura anterior es el ábaco respectivo al talud de material CL de 12 metros y 45 grados de inclinación, para ejemplificar el cómo acceder al ábaco necesitamos de los demás datos de entrada (ángulo de fricción, cohesión, peso específico y altura de nivel freático), debemos aclarar que el uso de estos ábacos se limita a los taludes que presenten los parámetros similares a los del modelo base tomado para realizar los análisis, estos parámetros se muestran en las tablas 2 y 3 del presente proyecto. Ahora bien continuando con el ejemplo tomamos los siguientes datos de entrada:

Peso específico: 20.3 kN/m<sup>3</sup>

Cohesión: 19.52 kPa

Angulo de fricción: 22.5°

Altura de nivel freático: 0 m y 0.5 m.

Vamos a hallar el valor del factor de seguridad correspondiente al valor del ángulo de fricción y las alturas de nivel freático mostradas anteriormente, para esto debemos convertir el valor del ángulo al valor del rango modificado utilizando la formula **(14)**.

$$Rv\phi = \frac{1}{25} * (\phi - 10) = \frac{1}{25} * (22.5 - 10) = \frac{1}{25} * 12.5 = 0.50$$

Con este valor de 0.50 debemos dirigirnos a la zona 1 de nuestro ábaco, ubicar el eje radial asignado para éste y adentrarnos en la gráfica hasta interceptar las curvas correspondientes a los niveles freáticos que para este caso son 0 y 0.5 metros, es decir la primera y la segunda curva del presente ábaco, para apreciar gráficamente este procedimiento observe la siguiente figura:



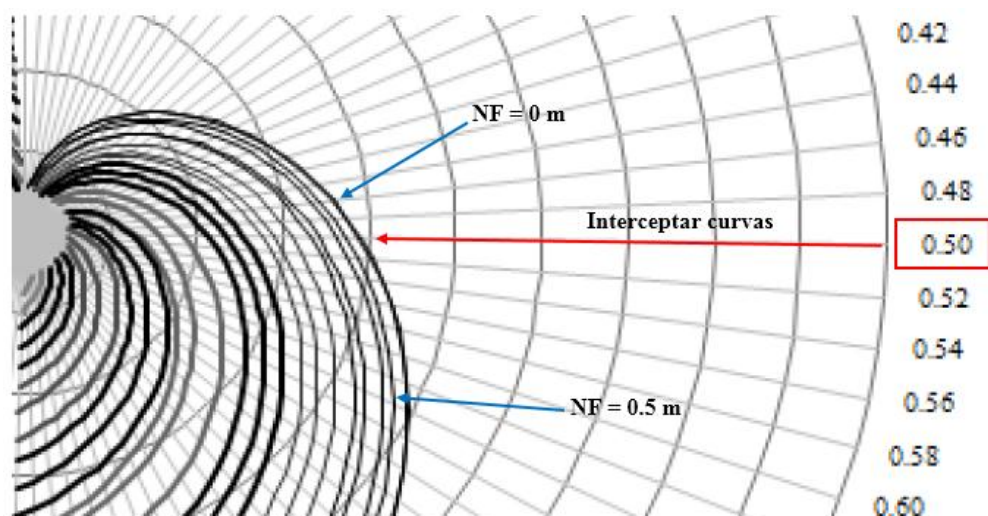


Figura 11. Procedimiento para determinar el factor de seguridad. Fuente: Autores del proyecto.

Ahora guiándonos con los ejes circulares que representan los valores del factor de seguridad, obtenemos el valor respectivo para cada nivel freático. Para un nivel freático de 0 metros el valor del factor de seguridad es aproximadamente de 1.18 y para el nivel de 0.5 metros es de 1.163. Con este breve procedimiento se puede obtener fácilmente los factores de seguridad, y de la misma manera se aplica para la obtención de estos con cohesión y peso específico.

Además estos valores de factor de seguridad se asocian a una probabilidad de falla por medio de tablas que se pueden encontrar en el [Apéndice C](#) de este trabajo. Como se ha venido mencionando durante el desarrollo de este capítulo, la gran cantidad de datos obtenidos del análisis probabilístico impidió el poder agrupar estos en un solo documento y se vio la necesidad de presentarlos en tablas de Microsoft Excel, estas tablas cuentan con la misma clasificación general de los ábacos, es decir se clasifican por tipo de material, altura y ángulo de inclinación.

Para encontrar la probabilidad de falla asociada al factor de seguridad encontrado en el ejemplo anterior debemos buscar el archivo correspondiente al material y a la altura determinada, en este caso sería material CL y altura de 12 metros, este archivo se encuentra en el [Apéndice C](#).

Nos encontraremos con la hoja de inicio de la tabla de probabilidad, donde tendremos los botones que nos llevan a las tablas de probabilidad respectivas a cada ángulo de inclinación.

Observe la siguiente figura:



 <b>Universidad</b> Francisco de Paula Santander Ocaña	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO Y DE SENSIBILIDAD EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES UTILIZANDO LA APLICACIÓN TABLAS DE PROBABILIDAD DE FALLA ASOCIADAS AL FACTOR DE SEGURIDAD	 <b>GIGMA</b> Grupo de Investigación Geotecnia y Medio Ambiente
AUTORES: JUAN CARLOS GUTIERREZ HERRERA Y MAICKOL FARID VELEZ VILLAMIZAR		
DIRECTOR: Msc. ROMEL GALLARDO		
MATERIAL: CL		ALTURA = 12 m
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; background-color: red; color: white; padding: 5px; text-align: center;">BETA = 45°</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; background-color: red; color: white; padding: 5px; text-align: center;">BETA = 50°</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; background-color: red; color: white; padding: 5px; text-align: center;">BETA = 55°</div> </div>		
* DE CLICK SOBRE LA OPCION QUE DESEA OBSERVAR		

Figura 12. Pantalla de inicio de la tabla de probabilidad del material CL y altura 12 metros.

Fuente: Autores del proyecto.

Siguiendo con el ejemplo, damos clic sobre el botón de 45° nos enviara a la tabla correspondiente a este grado de inclinación, en esta tabla encontraremos los datos correspondientes a los valores de factor de seguridad y su probabilidad asociada y clasificados según su la altura de nivel freático, que para el presente ejercicio es de 0 y 0.5 metros. En la siguiente figura observaremos la tabla de probabilidad para el talud representado en este ejemplo.



		ANALISIS PROBABILISTICO Y DE SENSIBILIDAD EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES UTILIZANDO LA APLICACIÓN SLOPE/W® TABLAS DE PROBABILIDAD DE FALLA ASOCIADAS AL FACTOR DE SEGURIDAD													
12 m - 45°															
S NF		NF = 0.00 m		NF = 0.50 m		NF = 1.00 m		NF = 1.50 m		NF = 2.00 m		NF = 2.50 m		NF = 3.00 m	
F.S	P (F.S < x)	F.S	P (F.S < x)	F.S	P (F.S < x)	F.S	P (F.S < x)	F.S	P (F.S < x)	F.S	P (F.S < x)	F.S	P (F.S < x)	F.S	P (F.S < x)
0.200	0.001	0.200	0.001	0.200	0.001	0.200	0.001	0.200	0.001	0.200	0.001	0.200	0.001	0.200	0.002
0.204	0.001	0.204	0.001	0.204	0.001	0.204	0.002	0.204	0.002	0.204	0.003	0.204	0.003	0.203	0.003
0.207	0.002	0.207	0.002	0.207	0.002	0.207	0.003	0.207	0.003	0.207	0.004	0.207	0.005	0.206	0.005
0.211	0.003	0.211	0.002	0.211	0.003	0.211	0.004	0.211	0.004	0.211	0.006	0.211	0.006	0.210	0.007
0.214	0.004	0.214	0.003	0.214	0.004	0.214	0.005	0.214	0.005	0.214	0.007	0.214	0.008	0.213	0.009
0.218	0.004	0.218	0.004	0.218	0.005	0.218	0.006	0.218	0.006	0.218	0.009	0.218	0.010	0.216	0.011
0.222	0.005	0.222	0.004	0.222	0.005	0.222	0.007	0.222	0.007	0.222	0.011	0.222	0.012	0.219	0.013
0.225	0.006	0.225	0.005	0.225	0.006	0.225	0.008	0.225	0.008	0.225	0.013	0.225	0.014	0.222	0.015
0.229	0.007	0.229	0.006	0.229	0.007	0.229	0.009	0.229	0.010	0.229	0.015	0.229	0.016	0.226	0.017
0.232	0.008	0.232	0.007	0.232	0.009	0.232	0.010	0.232	0.011	0.232	0.017	0.232	0.018	0.229	0.019
0.236	0.009	0.236	0.008	0.236	0.010	0.236	0.012	0.236	0.012	0.236	0.019	0.236	0.020	0.232	0.022
0.240	0.010	0.240	0.009	0.240	0.011	0.240	0.013	0.240	0.014	0.240	0.021	0.240	0.023	0.235	0.024
0.243	0.011	0.243	0.010	0.243	0.012	0.243	0.015	0.243	0.016	0.243	0.024	0.243	0.025	0.238	0.027
0.247	0.013	0.247	0.011	0.247	0.013	0.247	0.016	0.247	0.017	0.247	0.026	0.247	0.028	0.242	0.030
0.251	0.014	0.251	0.012	0.251	0.015	0.251	0.018	0.251	0.019	0.251	0.029	0.251	0.031	0.245	0.033
0.254	0.015	0.254	0.013	0.254	0.016	0.254	0.020	0.254	0.021	0.254	0.031	0.254	0.034	0.248	0.036
0.258	0.017	0.258	0.014	0.258	0.018	0.258	0.021	0.258	0.023	0.258	0.034	0.258	0.037	0.251	0.039

Figura 13. Tabla de probabilidad del material CL, altura 12 metros y beta 45°. Fuente: Autores del proyecto.

Para terminar con este procedimiento, nos desplazamos por la columna correspondiente nivel freático determinado hasta encontrar el valor del factor de seguridad encontrado por medio del ábaco de sensibilidad y encontrar la probabilidad de falla. Los valores de factor de seguridad hallados en el ejemplo planteado son para un nivel freático de 0 metros el valor del factor de seguridad es aproximadamente de 1.18 y para el nivel de 0.5 metros es de 1.163 y sus probabilidades de falla encontradas en las tablas son 54.45% y 55.65%, como se puede apreciar este ejemplo no cuenta con la estabilidad recomendada en el título H de la norma sismo resistente del año 2010 (NSR 10) la cual es de mínimo 1.5.

Para finalizar lo correspondiente a este objetivo, queda por aclarar que los autores con respaldo del director, optaron por no incluir los ábacos de los modelos que presentan

inestabilidad y que se encuentran dentro de las delimitaciones del proyecto, debido a que con dichas características no podría existir determinado talud.

#### **4.4 Crear un manual de usuario para el uso del software Slope/W® en el análisis probabilístico y de sensibilidad de estabilidad de taludes.**

Para elaborar el manual de usuario en donde se indica características, procedimiento de instalación y realizar todas las especificaciones necesarias para llevar a cabo análisis de sensibilidad y de probabilidad, como etapa previa se estudió y reconoció el programa durante los dos primeros meses de la investigación al mismo tiempo en que se iba desarrollando el cuerpo del trabajo, además se realizó un estudio del arte de donde se extrajeron las medidas más relevantes del documento, debemos añadir que además del ingeniero Romel Gallardo, el ingeniero español German López pineda hizo aportes por medio de sus documentos y asesorías en línea, con los cuales se pudo culminar con satisfacción el presente manual.

En el ejemplo de aplicación se retomó un modelo que es parte de la muestra y se le aplico todas las medidas necesarias para llevar a cabo los análisis de sensibilidad y probabilidad que se realizaron en el presente proyecto. En general se utilizó las herramientas de Microsoft office para la correcta estructura del manual. El manual se puede apreciar en el [Apéndice A](#) del presente proyecto.

## 5. Conclusiones

Para la evaluación de la estabilidad de taludes por medio de los análisis probabilísticos y de sensibilidad, se construyó una cartilla de ábacos, en donde se observa la tendencia de aumentar o disminuir que tiene el factor de seguridad en un talud dependiendo de las características que posea el mismo.

Debido a que se realizó un gran muestreo, se presentó a través de una cartilla de ábacos todas las posibles variaciones en el valor de la estabilidad, asociada a una probabilidad de falla, que se delimitó por el alcance planteado en el proyecto.

Es necesario aclarar que los datos de los modelos que están dentro del alcance del proyecto y no se incluyeron en los gráficos, es debido a que con determinadas características, el programa no encontró una convergencia en la solución, es decir con dichos parámetros no hay estabilidad posible.

Debido a que la mayoría de los datos graficados no poseían relación en sus tendencias, fue necesario fragmentar la clasificación de la cartilla de ábacos, para así poder establecer de manera elocuente y entendible la forma en como varía el factor de seguridad.

Dentro de la formación algodonal, se pudo establecer, que los taludes que se encuentran con características friccionantes presentan mayor estabilidad que los suelos arcillosos. Sin

embargo los suelos arenosos presentan mayor inestabilidad ante la ascensión del nivel freático que los suelos arcillosos, que si bien se ven afectados, no son tan propensos a disminuir su estabilidad.

La extensión de la corona del talud, así como el terreno que se proyecta desde el pie del mismo, no exime la aplicación de los ábacos realizados en el presente proyecto, ya que se realizaron pruebas cambiando las dimensiones de estos y se constató que el valor de la estabilidad no variaba considerablemente.

Gracias al método probabilístico Montecarlo integrado en el programa SLOPE/W<sup>®</sup> se pudo observar en que momento preciso un talud deja de ser estable debido a los factores condicionantes y desencadenantes como por ejemplo la ascensión de nivel freático, cuando ocurre un fenómeno hidrológico de pequeña o gran magnitud o por efectos antrópicos que pueden afectar de una u otra manera la estabilidad de un talud.

Otra aplicación que se le puede agregar a la cartilla de los ábacos es la de evaluar a grosso modo el diseño de terraplenes, que sostengan viviendas o cualquier otra estructura de cargas similares.

Con los análisis realizados en el presente proyecto quienes se encuentran delimitados por todas las variaciones mencionadas en el marco del mismo, se pudo observar que la estabilidad de un talud disminuirá a medida que se incremente su ángulo de inclinación o ascienda la presión

intersticial, aunque este último no afecte a los materiales de igual manera, debido a que las arcillas tienen mayor capacidad de absorber agua.

Se pudo observar que dentro del rango de valores utilizados para los parámetros resistentes del modelo Mohr-Coulomb. La cohesión es el parámetro de resistencia al cual el factor de seguridad es más sensible dentro de un talud y de igual forma que el factor de seguridad es menos sensible al cambio del valor del ángulo de fricción, debido a que con grandes variaciones de este parámetro, no se ve afectado de modo precipitado el coeficiente de estabilidad.

La investigación realizada permite presentar resultados de análisis No Determinístico, de tal manera que para cada valor de Factor de Seguridad estimado (teniendo en cuenta el análisis de sensibilidad con las variables más relevantes en la estabilidad del talud) se tendrá asociada una probabilidad de falla específica. Lo anterior será de gran utilidad cuando se estén realizando análisis de riesgo en diferentes escenarios para un talud, ladera o terraplén, debido a que nos permite establecer el nivel de amenaza que se tiene.

## 6. Recomendaciones

Debido a que los análisis propuestos, se realizan presentando la sensibilidad del factor de seguridad ante la posible variación de los parámetros que componen su estabilidad, es de tener en cuenta que el valor del factor de seguridad cambia frente a la variación de un solo parámetro y que los demás parámetros se mantienen constantes, por eso para llegar a una respuesta aceptable y de confiabilidad es necesario observar el valor de la estabilidad en los diferentes ábacos que componen una misma altura, ya que los autores consideraron que la altura es el parámetro con variabilidad casi nula, por eso se clasificaron los ábacos por tamaño.

El alcance de las soluciones representadas en los ábacos puede ayudar a evaluar la estabilidad de taludes homogéneos en general, compuestos de un solo estrato. Una buena aplicación de la herramienta, puede ser la evaluación de la estabilidad de pequeños taludes en los territorios que yacen sobre la formación algodonal.

Se recomienda utilizar los análisis no determinísticos, para poder encontrar la variación de la estabilidad en cualquier talud, debido a que estos son sistemas dinámicos y se mantienen en proceso constante de cambio.



Es recomendable realizar estos mismos estudios, para los diferentes tipos de suelo que se encuentran en el departamento y en el país, con ánimo de conocer o predecir en qué momento se presentara un fenómeno de remoción en masa.

Se invita a la comunidad interesada en profundizar sus conocimiento en el uso del software SLOPE/W<sup>®</sup>, consultar las guías del ingeniero español German López pineda.

## Referencias

- Ale Vélez, J. D. (2011, p. 24). Diagrama de metodología de Spencer. (s.f). scribd. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/53170729/ANALISIS-DE-ESTABILIDAD-DE-TALUDES#scribd>.
- Carvalho Maia, J. A. (2003). *Métodos Probabilísticos Aplicados À Estabilidade De Taludes E Cavidades Em Rocha*. (Tesis De Maestría). Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil. Traducido por autores. Recuperado de <http://www.geotecnia.unb.br/downloads/dissertacoes/099-2003.pdf>
- Cheng, Y.M, Lau C.K. (2014). *Slope stability Analysis and stabilization: New Methods and Insight*. Boca Raton, Florida: Taylor and Francis Group. Traducido por autores.
- Conde, G.J, & Álvarez, P.J.(2014) *Estudio de estabilidad de un talud ubicado en el barrio Bellavista del municipio de Ocaña, Norte De Santander*. (trabajo de grado) Universidad francisco de paula santander, Ocaña.
- Campos, O. Oliva, A. & Gallardo R. (Ed.). (2012). *Inestabilidad de laderas. Procesos constructivos de estabilización*. Saarbrücken, Alemania: editorial académica española
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos De Ingeniería Geotécnica*. p. 19. México D.F: International Thomson Editores S.A. ISBN: 970-600-172-5.
- De Matteis, Á. F. (2003). *Geología y geotecnia, estabilidad de taludes*. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina. Recuperado de <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>
- Escobar Toro, L. J. y Valencia Gonzales, Y. (2012). Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín - Bogotá en el tramo de vía entre marinilla y santuario. *Boletín De Ciencias De La Tierra*, 131. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31253/43364>
- GEO-SLOPE International Ltd. (2008). *Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version*. Calgary, Alberta, Canada: GEO-SLOPE International Ltd. Traducido por autores. Recuperado de <http://www.ottegroup.com/manuals/SLOPEW%202007%20engineering%20book.pdf>
- Hidalgo, C. y Assis, A. (octubre, 2011). *Evaluación de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de un talud excavado en suelos residuales*. En 14th Pan-American Conference

- on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Toronto, Canadá. Recuperado de <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper225.pdf>
- Juarez Badillo, E. (2005). *Mecanica de suelos*, Mexico: limusa. ISBN: 968-18-0069-9.
- Kerguelen Argumedo, A. (2009) *Análisis probabilístico de estabilidad de taludes*. (Tesis de maestría). Universidad de los Andes. Bogotá. Recuperado de [https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor\\_de\\_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzIyMDA5X3ByaW1lc9zZW1lc3RyZS83NzUucGRm](https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzIyMDA5X3ByaW1lc9zZW1lc3RyZS83NzUucGRm)
- Membreño Alarcón, D. F. (2012). *Análisis De Estabilidad De Taludes Por El Método De Elementos Finitos: Aplicación Al Terraplén De Entrada Viaducto De Mas Rubió*. (Tesis De Maestría). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/17868>.
- Pereira, M. (2012). *Modelos de análisis de estabilidad de taludes*. Universidad central de Venezuela. Caracas, República Bolivariana de Venezuela. Recuperado de <https://docs.google.com/document/d/1ty66m8Jn-MhVjbLDSZZ73l7lXEm3NxrM8-MfsNeRiMA/edit?pli=1>
- República De Colombia. Congreso De La República. Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. (24 de abril de 2012). Diario oficial, no. 48.411, 2012, 24, abril.
- Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. (s.f). *Arquys Arquitectura*. Recuperado de <http://www.arquys.com/construccion/resistencia-esfuerzo-cortante.html>
- Somos la revista. (17 de abril de 2011). 4 cierres totales de vías entre pamplona y Cúcuta, dos entre Ocaña y Sardinata y 13 más en el país, reporta policía de carreteras. Recuperado de <http://somoslarevista.com/2011/04/4-cierres-totales-entre-pamplona-y-cucuta-dos-entre-ocana-y-sardinata-y-13-mas-en-el-pais-reporta-policia-de-carreteras/>
- Suarez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda. Recuperado de <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>

# Apéndices

**Apéndice A. Manual SLOPE/W**

Ver archivo adjunto.

## **Apéndice B. Ábacos**

Los ábacos en los que se representan la variación del factor de seguridad en función de los parámetros inherentes que afectan la estabilidad de un talud y que son resultado del análisis de sensibilidad hecho en este proyecto, se encuentran distribuidos de acuerdo al tipo de su material, altura del talud e inclinación de este.

Se pueden apreciar en el archivo adjunto.

Ver archivo adjunto.

### **Apéndice C. Tablas probabilidades de falla**

Las tablas que contienen las probabilidades de falla asociadas a la variación del factor de seguridad representada en los ábacos del Apéndice A de este proyecto, se encuentran en los siguientes archivos de Microsoft Excel donde podrá navegar entre ellos por medio de hipervínculos referenciados por la altura e inclinación del talud.

Ver archivo adjunto.

## **Apéndice D. Modelos en SLOPE/W**

En el siguiente enlace podremos dirigirnos hacia las carpetas de los modelos y simulaciones en SLOPE/W, que se clasificaron principalmente por el grado de inclinación y dentro de cada una de ellas por la altura.

Ver archivo adjunto.



**Apéndice E. Tablas de Excel (Recolección de datos)**

En las siguientes hojas de cálculo reposan los datos extraídos después de efectuarse los análisis de sensibilidad y probabilidad.

Ver archivo adjunto.

**Apéndice F. Tablas de Excel (datos graficas)**

En la siguiente carpeta encontrará los archivos donde se crearon las gráficas para los ábacos producto del presente proyecto.

Ver archivo adjunto.