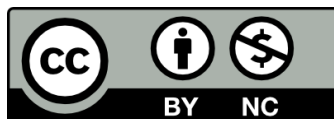


GENERACIÓN DE UN ALGORITMO DE SIMULACIÓN PARA LA SUSCEPTIBILIDAD
DE SUELOS A LA REMOCIÓN EN MASA UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB



JUAN ESTEBAN ARÉVALO BARRERO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2018

GENERACIÓN DE UN ALGORITMO DE SIMULACIÓN PARA LA SUSCEPTIBILIDAD
DE SUELOS A LA REMOCIÓN EN MASA UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB

JUAN ESTEBAN ARÉVALO BARRERO

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por el Título de Ingeniero Ambiental

Asesor:

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

PhD. Msc. Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2018

Autoridades Académicas

Fray. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

Rector General

Fray. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

Fray. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio

Fray. FERNANDO CAJICÁ GAMBOA O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Adm. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRAN

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

FIRMA YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRAN

Decano de Facultad

FIRMA CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director Trabajo De Grado

•
Jurado

•
Villavicencio **Agosto 2018**

Agradecimientos

A mi familia, muchas gracias por todo ese apoyo incondicional que me brindaron principalmente a mis padres, su amor, su apoyo y ayuda tanto económica como emocional brindada durante toda la carrera fueron las bases que me permitieron llegar a hacer este trabajo.

A mi amada pareja que durante todo el transcurso de la carrera me brindó todo su apoyo, amor y motivación para siempre seguir adelante en todos los distintos retos que surgieron en el camino.

A mi tutor por haberme brindado sus enseñanzas, el tiempo y orientación que permitieron desarrollar este proyecto, por estar disponible cada vez que requería hacer una consulta, por brindarme su apoyo.

Al profesor Cesar Riveros, por brindarme ayuda cuando lo requería, resolverme las dudas que le preguntaba y brindarme valiosa información. Su guía me permitió resolver diversas dudas de forma oportuna y eficaz.

A mi buen amigo José David Salinas por brindarme apoyo y ayuda cada vez que la requería a pesar de él también estar ocupado en un trabajo de grado distinto.

A todas aquellas personas como amigos y profesores que me brindaron su compañía, enseñanzas y guías que fueron base en mi proceso formativo tanto personal como académico.

Contenido

Resumen	10
Abstract	11
1. Introducción	12
2. Planteamiento del problema	13
3. Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
4. Justificación	15
5. Alcance	16
6. Antecedentes	17
7.1. Factores a tener en cuenta en general para realizar el talud infinito:	22
7.2. Factor de seguridad	22
7.3. Fórmulas utilizadas en el programa:	24
7.3.1. Para un suelo seco y sin cohesión.	25
7.3.2. Esfuerzos totales	25
7.3.3. Saturado y con cohesión.	26
7.3.4. Esfuerzos efectivos con cohesión igual a cero	26
7.3.5. Esfuerzos efectivos con cohesión igual a cero y flujo paralelo a la superficie del terreno	26
7.3.6. Ecuación general	27
7.3.7. Con presencia de sobrecargas de árboles.....	27
7.3.8. Presencia de coeficientes sísmicos pseudoestáticos.	28
7.4. Implementación de las ecuaciones.	28
7.5. Marco Legal:	30
8. Metodología	32
8.1. Fase 1: Búsqueda de información e identificación de parámetros	32
8.2. Fase 2: Implementación de las fórmulas en MATLAB	33
8.3. Fase 3: Obtención de los datos para probar el programa	33
8.3.1. Obtención de muestras	33
8.3.2. Obtención de las alturas	34
8.3.3. Transporte de muestras	34

8.3.4. Obtención de datos para calcular el ángulo de fricción interna	34
8.3.5. Medición del peso volumétrico	35
8.3.6. Obtención del valor de la cohesión	35
8.3.7. Obtención del valor de las profundidades.	37
8.4. Fase 4: Codificación, depuración y prueba del algoritmo	37
9. Resultados	38
9.1. Búsqueda de fórmulas e identificación de <i>inputs</i>	38
9.2. Generación del programa	38
9.3. Pruebas del algoritmo con bibliografía	46
9.4. Implementación de las variables	47
9.5. Susceptibilidad a la remoción en masa en Loma Linda.....	51
9.6. Susceptibilidad a la remoción en masa en la zona de muestreo de Pipiral.....	51
10. Conclusiones	53
11. Recomendaciones	55
Referencias bibliográficas	57

Lista de tablas

Tabla 1. Criterios para seleccionar un factor de seguridad para diseño de taludes.....	23
Tabla 2. Susceptibilidad a la remoción en base al factor de seguridad.....	23
Tabla 3. Parámetros de las fórmulas de talud infinito	24
Tabla 4. Comandos del script	29
Tabla 5. Marco legal del proyecto	30
Tabla 6. Características medias de los suelos para anteproyectos (EAU-1970).....	35
Tabla 7. Características geotecnicas del talud "Las Piritas"	46
Tabla 8. Parámetros tomados de manera experimental en los dos sitios seleccionados	48
Tabla 9. Variables ingresadas y factor de seguridad obtenido.....	50

Lista de figuras

Figura 1. Número de artículos científicos publicados por año en la base de datos Scopus	19
Figura 2. Representación gráfica de los parámetros empleados en la fórmula	28
Figura 3. Diagrama de la metodología empleada para la construcción del Software.	32
Figura 4. Primera sección del algoritmo de simulación.	40
Figura 5. Segunda sección del algoritmo de simulación.	40
Figura 6. Tercera sección del algoritmo de simulación.	41
Figura 7. Cuarta sección del algoritmo de simulación.	42
Figura 8. Código relacionado con las variables solicitadas.	43
Figura 9. Código relacionado la aplicación de las fórmulas.	45
Figura 10. Código relacionado con la determinación de la susceptibilidad.	45
Figura 11. Ingreso de los parámetros del talud “Las Pitas”	47
Figura 12. Resultados de la implementación de los datos obtenidos.	49
Figura 13. Datos ingresados para la muestra de Pipiral.	49
Figura 14. Susceptibilidad a la remoción en masa.	50
Figura 15. Material desprendido en el talud de muestreo.	52

Resumen

En el presente trabajo se realizó un algoritmo de simulación mediante el software MATLAB cuyo objetivo fue implementar distintos tipos de ecuaciones que corresponden al método de talud infinito para determinar el factor de seguridad de un talud. Para lograr dicho objetivo se utilizaron fórmulas relacionadas al método en cuestión tales como: para un suelo seco y sin cohesión, con coeficientes sísmicos pseudoestáticos, con esfuerzos efectivos o esfuerzos totales, entre otros. Los parámetros necesarios para la ejecución de los cálculos son el ángulo de la pendiente, el ángulo de fricción interna, espesor de la capa de suelo, espesor de la capa húmeda del suelo, cohesión, peso unitario del suelo saturado, peso unitario húmedo del suelo, presión de los poros, profundidad a partir del nivel freático, peso unitario efectivo, profundidad del talud, coeficiente sísmico horizontal, coeficiente sísmico vertical, fuerzas de estabilidad, peso total del talud, esfuerzo de resistencia al corte, espesor de la capa del suelo, espesor de la capa del suelo saturada, resistencia generada por las raíces de los árboles, sobrecarga por el árbol, que servirán de datos de entrada o “inputs” del algoritmo. Finalmente se obtuvo un algoritmo con una interfaz gráfica lo suficientemente sencilla, para que el usuario al ejecutar el programa tenga una clara idea de los requerimientos de las fórmulas. Posteriormente estos resultados son almacenados en el programa las veces que el usuario lo requiera (siempre que no excedan a 10 en una única sesión). Para poder llevar a cabo una prueba del algoritmo se realizó una toma de muestras en la Universidad Santo Tomás Sede Loma Linda y en un talud cercano al Peaje Pipiral en la vía Bogotá – Villavicencio. Una vez se introdujeron los datos de entrada obtenidos en el programa, este pudo realizar los cálculos necesarios para hallar el resultado del factor de seguridad mostrando el nivel de susceptibilidad. Los valores de factor de seguridad calculados por el programa dieron como resultado 1,164 para el caso de Loma Linda y 0,913 para el caso de Pipiral lo que indicaría según dichos resultados que son zonas con media y alta susceptibilidad a la remoción en masa respectivamente según la escala del Servicio Geológico Colombiano.

Palabras clave: Talud infinito, modelación, suelos.

Abstract

In the present document was realized a simulation algorithm using the software MATLAB. The application implemented different types of equations from the infinite slope method in order to determinate a factor of safety in a slope. To achieve this objective were used different types of equations, each one correspond to the infinite slope model and that equations are: for a dry soil and without cohesion, with pseudo-static seismic coefficient, and others. The parameters needed to use all the equations are the slope angle, internal friction angle, thickness of the soil layer, thickness of the wet soil layer, cohesion, saturated soil unit weight, wet soil unit weight, pore pressure, phreatic level depth, effective unit weight, slope depth, horizontal seismic coefficient, vertical seismic coefficient, stability forces, total weight of the slope, resistance to shear stress, thickness of the soil layer, thickness of the saturated soil layer, resistance generated by trees, overload by the tree, which will serve of input data of the algorithm. Finally was created an algorithm with a friendly graphic interface to be used by any user, in which the required input data to execute the program is clearly visible. After be used, the results are saved on the application any times as the user ask for (with a maximum of 10 times in only one session). In order to test the algorithm, it was taken some soil samples on Santo Tomas University Campus Loma Linda's ground and a slope near from Pipiral's Toll on the Bogotá- Villavicencio road. The safety factor calculated by the software for Loma Linda is 1,164 and Pipiral 0,913 which indicates that are zones with medium and high landslide risk.

Keywords: Infinite slope, modelation, soils.

1. Introducción

Los fenómenos de remoción en masa en Colombia pueden llegar a generar una gran cantidad de pérdidas económicas, sociales y afectación ambiental, siendo las personas de más bajos recursos los más vulnerables a dichos fenómenos. Esto es ocasionado dada la tendencia de crear asentamientos en zonas que son muy susceptibles a la remoción en masa, lo que ocasiona una pérdida de hogares y en algunos casos hasta de vidas, como se tiene registrado en la base de datos de DesInventar, en la cual durante el periodo de 1970-2010, registra aproximadamente de 8441 muertes registradas ocasionadas por deslizamientos a lo largo de todo el país (Campos *et al*, 2012). Por otro lado, los fenómenos de remoción en masa son un constante problema en algunas vías del país que atraviesan zonas montañosas, pudiendo afectar a viajeros que se encuentren en el lugar del accidente o bloqueando y dañando la vía generando tiempos de viaje mucho más largos al obligarle a los afectados a tomar rutas alternas o simplemente esperar en el lugar hasta que se solucione dicho problema, que en el caso de los transportistas que necesiten utilizar la vía se puede llegar a traducir en pérdidas de millones de pesos. Con base en lo anterior nace la necesidad de conocer los distintos procesos de remoción en masa y la probabilidad de que estos sucedan para así tomar distintas medidas preventivas que permitan reducir la probabilidad de su ocurrencia o, al menos su magnitud. A pesar de que existe una gran cantidad de métodos como lo son las Tablas de Janbú, el de Morgensten, el de Talud Infinito o el de Ábacos de Duncan, “dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios, lo que es una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad” (Suárez, 1998)

El método de talud infinito es un método que se suele implementar por ser uno de los métodos más sencillos de usar. Se suele utilizar con otros análisis de estabilidad, o en algunos casos como único método (Delgado *et al.*, 2018), en comparación con otros métodos (Curipoma, 2017), o para la proposición de nuevas metodologías (Griffiths *et al.*, 2011).

Este modelo podría implementarse como un estudio preliminar en taludes que cumplan con los requisitos para su ejecución, permitiendo conocer un valor aproximado, para determinar si es necesario llevar a cabo estudios más complejos de estabilidad, en caso de que se detecte algún riesgo de movimiento en masa, con el fin de evitar posibles impactos ambientales y sociales.

1. Planteamiento del problema

A pesar de que existen programas para determinar el valor del factor de seguridad, estos programas no suelen contar entre sus métodos de análisis el método del talud infinito, el cual es el empleado en la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (Ávila *et al.* 2016). Este proyecto busca suplir la ausencia de un algoritmo de simulación que utilice el método de talud infinito usando distintas ecuaciones.

El aumento de la erosión es uno de los factores por los que se pueden generar movimientos en masa en los suelos, en zonas donde la erosión es muy elevada puede hacer al suelo muy susceptible a dichos fenómenos.

- La gran mayoría de los suelos en Colombia no son utilizados para el uso vocacional con que se encuentran constituidos y reglamentados por las autoridades ambientales y rurales; cómo se podría denotar en el caso de la ganadería, según el Ministerio de Educación “de las 38,5 millones de hectáreas que están destinadas a la ganadería, sólo 19,3 millones tienen vocación ganadera” (MINEDUCACIÓN, 2013).
- Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi “un total de 21.373.121 hectáreas generan una gran amenaza al proceso de remoción en masa” (Betancur, 2016).
- A pesar de que la erosión se genera de manera natural, “el ser humano por diversos tipos de actividades hace que la erosión se genere de forma más intensa y a mayor velocidad” (OAS, 1991).

Aunque existen mapas y estudios sobre la susceptibilidad del suelo a procesos de remoción en masa, dichos estudios se realizan de manera general a lo largo del territorio nacional. Para el caso de que se requieran datos más específicos, es escasa o inexistente la información, a excepción de ciertas zonas urbanas, donde el Servicio Geológico Colombiano ha realizado los estudios pertinentes.

2. Objetivos

Objetivo general

Generar un programa de simulación que permita determinar el grado de susceptibilidad en suelos a la remoción en masa al implementar el método de talud infinito en el programa MATLAB.

Objetivos específicos

- Identificar distintos tipos de fórmulas y parámetros requeridos para poder implementar el método de talud infinito.
- Implementar las fórmulas en el lenguaje de programación y estructura de cálculo de MATLAB, donde se integrarán en un programa de simulación.
- Obtener datos para la ejecución y prueba del programa por medio de experimentación de campo.

4. Justificación

A lo largo de Colombia como consecuencia del accidentado relieve suelen presentarse distintos tipos de movimientos en masa y remoción del suelo. Como se puede mencionar en el área de la ciudad de Bogotá donde se han registrado una gran cantidad de movimientos en masa en las zonas con pendientes pronunciadas (IDIGER, 2016). Este tipo de desastres naturales pueden llegar a ocasionar daños sociales y económicos considerables.

Es por esta razón que se genera la necesidad tener un amplio conocimiento de los distintos métodos para poder determinar la susceptibilidad de los suelos a ser afectados por la remoción en masa, entre los cuales el método de talud infinito al ser uno de los métodos más sencillos de hacer, permite realizar análisis preliminares de estabilidad permitiendo conocer un valor aproximado del factor de seguridad de forma rápida y relativamente sencilla, para de esa forma tomar las medidas pertinentes o realizar estudio más detallados. Este método también es recomendado por distintos autores que lo han utilizado en sus estudios como Curipoma, que en una de sus conclusiones escribe “Los ábacos de talud infinito pueden considerarse adecuados en análisis preliminares de suelos poco o nada cohesivos” (Curipoma, 2017).

De esta forma se presenta una solución a un problema real que es determinar qué tan susceptible es un terreno de ser afectado por la remoción en masa, debido a los posibles impactos sociales, económicos y ambientales que puede llegar ocasionar un evento de remoción en masa.

5. Alcance

El proyecto en cuestión es un algoritmo de simulación, al que se ingresarán diversas variables, necesarias para poder determinar el valor del factor de seguridad por medio del método de talud infinito. Para ejecutar y probar el algoritmo se realizó un estudio experimental a través de dos muestreos. El primero fue en un área de la Universidad Santo Tomás Villavicencio Campus Loma Linda (Anexo 1), la cual corresponde a las coordenadas $4^{\circ}06'36''$ N y $73^{\circ}39'20''$ O.

Por otro lado, el segundo muestreo se realizó en la vía Bogotá-Villavicencio en las cercanías de Pipiral, dado a que en dicha zona se presentan diversos fenómenos de remoción en masa, como el ocurrido en día 25 de Junio del 2017 a dos kilómetros del peaje de Pipiral donde se registró una caída de piedras dejando así la vía estancada durante 6 horas (EL TIEMPO, 2017). La zona donde se realizó el muestreo está ubicada en las coordenadas $4^{\circ}12'10.89''$ N, $73^{\circ}42'56.79''$ O, unos metros antes del Peaje de Pipiral por la vía antigua a Bogotá en la zona que se evidencia en el Anexo 2.

La población a impactar sería principalmente los distintos profesionales como geólogos, ingenieros ambientales, civiles, entre otros que por algún motivo requieran implementar el método de talud infinito, de tal forma de no requerir realizar cálculos manualmente, sino solo utilizar algoritmo.

6. Antecedentes

En primer lugar se puede denotar que existe una abundante información sobre los procesos de remoción en masa, sobre cómo detectarlos y la susceptibilidad que tienen distintas zonas a ser afectados por ellos. Así como noticias y sucesos donde se han presenciado procesos de remoción en masa, siendo estos detonados tanto por sismos como por las variaciones en el contenido de humedad del suelo. La ocurrencia de sismos es un factor para que se desate un fenómeno de remoción en masa dado a que desestabiliza el talud y le genera un cambio a los esfuerzos, pudiendo generar deslizamientos, como en el caso de un terremoto de California Estados Unidos que generó varios deslizamientos: “Uno de los efectos más significativos del terremoto de Northridge, California, del 17 de Enero de 1994 (magnitud 6,7) fue la generación de miles de deslizamientos en las zonas circundantes”(Parise *et al.*, 2000).

En otro ámbito, también se han generado un considerable número de artículos científicos, donde se tratan métodos de remoción en masa por medio del método de talud infinito. Ejemplo de ello se encuentra en el trabajo de Jung *et al.*, 2012, realizado en Corea; donde se utilizó el método de talud infinito en adición a un modelo hidrológico, considerando que este método no tiene en cuenta la intensidad de las lluvias, por lo que se agregaron propiedades hidráulicas de los suelos, con el fin de mejorar la exactitud obtenida. Para ello se analizaron las propiedades geomecánicas e hidráulicas de muestras de suelo tomadas en una zona con alta presencia de eventos de remoción en masa en Corea, donde los resultados arrojaron que la consideración de un sistema hidrológico en el método de talud infinito empleado, mejoró su exactitud.

En el ámbito de Latinoamérica también hay estudios de amenaza a la remoción en masa, como el realizado en Chiapas, México (Paz *et al.*, 2017), donde se realizó un mapa de amenazas por procesos de remoción en masa a partir del método heurístico junto al análisis multicriterio, con lo que se pudo determinar el nivel de amenaza en la zona urbana, además de hacer una descripción de la geología y edafología del lugar mientras se relacionaban con la susceptibilidad.

Un trabajo de tesis en el que se trata sobre el talud infinito, realizado en Ecuador (Curipoma, 2017), implementó un análisis comparativo de distintas metodologías de cálculo de estabilidad de

taludes, entre las que se encuentra el método de Bishop simplificado, de Janbú simplificado, de Spencer, ábacos de Taylor y ábacos de Hoek y Bray. En este trabajo se realizaron 5 ejercicios en base a 2 zonas de muestreo en los que se calculó el factor de seguridad usando cada uno de los métodos a cada uno de los ejercicios. Como resultado se evidenció que cada uno de los métodos dio resultados similares entre los que se incluye el talud infinito con unos valores medios.

En un ámbito nacional se han encontrado diversos estudios donde se determina la susceptibilidad de los taludes a fenómenos de remoción en masa, uno de estos estudios fue el realizado en la ciudad de Bogotá (Trujillo Vela y Ramos Cañón, 2012), donde se aplicó un modelo para la simulación de procesos de remoción en masa usando una comparación con el método de talud infinito. En el trabajo mencionado se implementa un procedimiento para modelar flujos de material desagregado por medio de las fórmulas de conservación de *momentum*, del factor de seguridad, la expresión del desplazamiento instantáneo del flujo y la ecuación de velocidad instantánea de flujo. Para aplicar lo anteriormente descrito, Trujillo y Ramos escogieron un talud de Bogotá y con ello determinaron el factor de seguridad por medio del método de talud infinito y compararon su resultado con la metodología utilizada por ellos.

En adición a los estudios mencionados con anterioridad, en la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (Ávila *et al*, 2016), determinó la zonificación de la amenaza basados en la determinación del factor de seguridad. Este valor fue hallado por el método de talud infinito, a este factor de seguridad se le relaciona con fórmulas relacionadas con la probabilidad de sismos y de lluvia, dos grandes factores detonantes al momento de suceder un proceso de remoción en masa, por lo que al proponer la fórmula se generó una donde se integró tanto lluvia como probabilidad de sismo en el factor de seguridad; en esta institución también se propone que cuando se va a clasificar la estabilidad de los taludes en roca se requiere de una fórmula distinta, la cual es en función del SMR (*SlopeMass Rating*). Esta metodología proporciona información sobre el factor de seguridad en diferentes condiciones y para distintos tipos de fallas, con el fin de aplicar la más pertinente, dependiendo de las distintas características que posean los suelos.

Un último aporte, es el trabajo “Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales” (Suárez, 1998), donde se explica una diversa cantidad de métodos para determinar la amenaza de

los taludes a sufrir procesos de remoción en masa, para lo cual al momento de determinar el factor de seguridad se mencionan distintos métodos como lo son: el método de tablas o número de estabilidad, método de talud infinito, método de bloque deslizante, método ordinario o de Fellenius, método de Bishop, método de Janbú, análisis por elementos finitos y análisis en tres dimensiones.

Los anteriores aportes fueron trabajos específicos que se desarrollaron con temas relacionados a los fenómenos de remoción en masa y temas pertinentes al proyecto; por otro lado, en una vista más general se realizó la vigilancia tecnológica con el objetivo de evidenciar que tantas publicaciones se han generado con el pasar de los años en una base de datos, donde en este caso se realizó en Scopus utilizando las palabras “*Infinite slope model*”, “*Modelation*”, “*soil*”, “*matlab*” y “*landslide*”. Al ingresar las palabras mencionadas anteriormente se generó un total de 90 artículos científicos en toda la base de datos donde 86 de esos fueron realizados en los últimos 20 años.

En la Figura 1 se puede apreciar una gráfica que muestra la cantidad de artículos publicados en la base de datos mencionada por año a lo largo de los últimos 20 años con las palabras “*Infinite slope method*”, “*modelation*”, “*soil*”, “*matlab*” y “*landslide*”, donde se puede evidenciar que en el año 2014 fue donde más se publicaron artículos con las palabras relacionadas con la búsqueda con un total de 12 artículos. Esto es un indicio de la relevancia del tema en los últimos años.

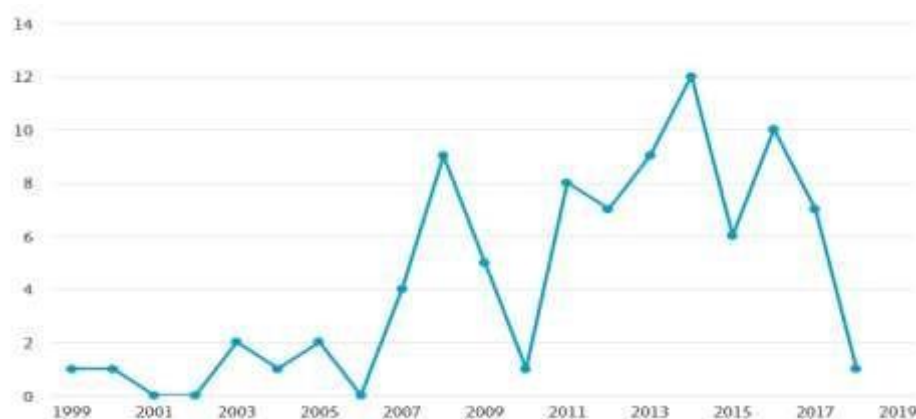


Figura 1. Número de artículos científicos publicados por año tomado de la base de datos Scopus,

7. Marco de referencia

Para el desarrollo del presente trabajo se tuvo en cuenta diversos conceptos, desde los que tratan el campo de la geología e ingeniería; como lo que es un talud, los distintos métodos de estabilidad de taludes, el factor de seguridad, el tipo de suelo y sus propiedades. Hasta conceptos de programación como condicionantes, secuencias repetitivas, establecer variables; de forma que se hace de vital importancia poder dar un breve preámbulo en todos los conceptos y herramientas que se utilizaron en el algoritmo de simulación.

Al momento de generar el algoritmo de simulación a procesos de remoción en masa de suelos, se requiere conocer una diversa cantidad de conceptos que permitan implementar de manera correcta distintos tipos de modelos matemáticos en forma de algoritmos y posteriormente programas o aplicaciones. Para ello como punto de partida se empezaría por la pregunta ¿Qué es un modelo matemático?, este podría definirse como “una formulación o una ecuación que expresa las características esenciales de un sistema físico o de un proceso en términos matemáticos” (Chapra y Canale, 2006).

La implementación de los distintos modelos matemáticos en el algoritmo de simulación es lo que permite la creación de la aplicación, tal como lo menciona Efraín Domínguez “el proceso de modelación matemática de cualquier objeto cognitivo (proceso, fenómeno) consiste en un plan de trabajo preciso que se enmarca en tres etapas que conforman la trilogía modelo – algoritmo – programa” (Domínguez, 2010), de igual forma en el presente trabajo se toman los distintos modelos matemáticos que representan el método de talud infinito, se agrupan en un algoritmo y se ejecutan dentro del programa de MATLAB.

Para iniciar el proceso de modelamiento es necesario comenzar por la definición del concepto a modelar: Un proceso de remoción en masa es en pocas palabras “desplazamiento del terreno que constituye una ladera o un talud, hacia el exterior del mismo y en sentido descendente.” (Escobar

y Duque, 2016) De forma que los movimientos en masa son porciones de terreno que se desplazan descendiendo por la ladera o el talud, donde pueden estar compuestos de flujos de detritos, flujos de tierras, avalanchas de rocas, entre otros. Estos tipos de movimientos se pueden caracterizar dependiendo de diversos factores como su velocidad, tipo de movimiento, material involucrado, además de otras categorías.

Existen diversas causas que podrían ocasionar un fenómeno de remoción en masa, entre ellas las más comunes son los procesos litológicos en los que se presenten materiales con baja cohesión; zonas que posean pendientes muy pronunciadas donde se supera el ángulo de reposo de un material; procesos del clima, cuando existen precipitaciones frecuentes; procesos tectónicos, cuando intervienen las ondas sísmicas en los movimientos del terreno y los procesos antrópicos, que se refieren a la acción del hombre sobre el medio ambiente (García, 2014). A pesar de que existen diversos factores que pueden afectar la susceptibilidad a la remoción en masa, es necesario que se genere un detonante que los active debido a que la sola pendiente o los factores litológicos no generan dichos procesos. Entre los factores detonantes se encuentran las lluvias y terremotos, por lo que estos alteran las condiciones y propiedades del terreno aumentando su susceptibilidad, hasta que se genere la remoción en masa.

Un talud se le denomina a “cualquier superficie inclinada del suelo o de un macizo rocoso. Puede ser natural, también llamado ladera, o construido por el hombre, como en los cortes y terraplenes.” (Gerscovich, 2015). En la naturaleza principalmente cerca de zonas montañosas se pueden encontrar una gran cantidad de taludes e incluso en estado erosivo avanzado, debido a que la erosión es un proceso natural que se ha venido generando desde la formación de las primeras cordilleras y montañas, dando paso a los distintos relieves actuales. El problema ocurre cuando estos procesos son acelerados por el ser humano y además cuando hay una posible afectación social o económica en caso de que se genere dicho proceso de remoción en masa.

Los taludes pueden ser clasificados en dos tipos, los taludes naturales y los artificiales. “Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o

simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales.” (Matteis, 2003)

Por otro lado, si se busca realizar un algoritmo de simulación para los procesos de remoción en masa utilizando el método de talud infinito, es necesario explicar en qué consiste dicho modelo y cuáles son sus características. El talud infinito es un método para determinar el factor de seguridad de un suelo, donde dicho modelo parte de unos supuestos que son “una inclinación constante, una extensión ilimitada y unas condiciones y propiedades constantes del suelo a cualquier profundidad desde la superficie del talud” (Gerscovich, 2015). En pocas palabras se requiere que el talud presente unas condiciones relativamente homogéneas a lo largo de este. A pesar de que se trate del método de talud infinito, existe una gran cantidad de fórmulas distintas que incluyen distintos parámetros para tratar este método, algunas incluyen la cohesión (Suárez, 1998), otras incluyen distintos esfuerzos efectivos (Escobar *et al.*, 2016), otras requieren una cohesión específica (Escobar *et al.*, 2016), entre otros.

Para la generación del algoritmo se utilizó un total de 8 fórmulas del método de talud infinito que corresponden a “Para un suelo seco y sin cohesión”, “Saturado y con cohesión” “Presencia de coeficientes sísmicos pseudoestáticos”, “Esfuerzos efectivos con cohesión igual a cero”, “Esfuerzos efectivos con cohesión igual a cero y flujo paralelo a la superficie del terreno”, “Esfuerzos totales”, “Con presencia de sobrecargas de árboles” y “Ecuación general”.

7.1. Factores a tener en cuenta en general para realizar el talud infinito:

Al momento de poder implementar el talud infinito se han de tener diferentes factores en cuenta, tanto en las características propias del talud como en su extensión. Dichas características son

“inclinación constante, extensión ilimitada, condiciones y propiedades constantes del suelo a cualquier profundidad desde la superficie del talud” (Escobar *et al.*, 2016)

7.2. Factor de seguridad

Al momento de definir el talud infinito se pudo haber generado otra duda que sería ¿Qué es el factor de seguridad? El factor de seguridad puede ser definido como una variable “empleada por

los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña.” (Estabilidad de taludes, 2013)

El factor de seguridad es un valor adimensional que permite determinar qué tan susceptible es un talud a los fenómenos de remoción en masa, estos factores de seguridad requieren un valor mínimo para realizar una construcción que puede variar dependiendo de la legislación que se posea en los distintos países. Aun así, en el libro de Estabilidad de Taludes (Suárez, 1998) se recomienda unos valores mínimos del factor de seguridad como los muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios para seleccionar un factor de seguridad para diseño de taludes.

Caso	Factor de seguridad
Si puede ocurrir la pérdida de vidas humanas al fallar el talud.	1.7
Si la falla puede producir la pérdida de más del 30% de la inversión de la obra específica o pérdidas consideradas importantes.	1.5
Si se pueden producir pérdidas económicas no muy importantes.	1.3
Si la falla del talud no causa daños.	1.2

NOTA: Factor de seguridad mínimo requerido en base a distintos casos para el diseño de taludes. Tomado de Deslizamientos y estabilidad de taludes en zona tropicales. Por Jaime Suárez 1998.

A pesar que se enuncian en la Tabla 1 los valores mínimos que debería tener un talud principalmente al realizar una construcción, al momento de determinar un factor de seguridad en un talud es necesario saber que tan susceptible es este talud de ser afectado por la remoción en masa con base al factor de seguridad dado. En la Tabla 2 se encuentran categorizados los valores del Factor de Seguridad en función a la susceptibilidad posible de remoción de masa lo que permite valorizar preliminarmente un terreno analizado con este método.

Tabla 2. Susceptibilidad a la remoción en base al factor de seguridad

Factor de seguridad	Susceptibilidad a la remoción en masa
Menor a 1,1	Alta
1,1 – 1,5	Media
Mayor a 1,5	Baja

NOTA: Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Tomado del Servicio Geológico Colombiano 2016.

Actualmente existen variados de métodos para determinar la amenaza a los procesos de remoción en masa, entre ellos se pueden encontrar el método de Talud infinito, de Bishop simple, de Janbú, de Spencer, de Sarma, entre otros. A pesar de que existen múltiples métodos incorporados en distintos programas, el de talud infinito no se encuentra con varias ecuaciones,

puesto a que en los pocos que hay solo se enfocan en una sola ecuación teniendo que conseguir distintos tipos de programas y cálculos manuales en caso de requerirse, a pesar de ser recomendado por la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. (Ávila *et al*, 2016).

Entre los métodos mencionados antes, los principales son el método de Janbú, de bloques o cuñas, de Bishop, de Morgenstern y Price, entre otros. Dichos métodos son muy distintos unos de otros cada uno con sus fortalezas, debilidades y precisión; sin embargo si se utilizaran dos métodos diferentes para determinar un factor de seguridad, a pesar de que los datos que se utilizaran en los métodos fuesen los mismos el resultado variaría por la misma precisión que ofrecen los distintos métodos. (Suárez, 1998)

En el presente documento se optó por usar el método de talud infinito principalmente debido a que es un método relativamente fácil y que a su vez posee diversos tipos de fórmulas, parámetros y métodos dependiendo de la fuente, por lo que un algoritmo de simulación que reúna en un solo lugar varias de estas fórmulas tendría una gran utilidad. Por otro lado, a pesar que también existen diversos programas que permiten determinar el factor de seguridad por los otros métodos, hay muy pocos que se enfocan en el talud infinito y aún menos aquellos que utilizan distintos tipos de fórmulas en vez de solo una.

7.3. Fórmulas utilizadas en el programa:

Tabla 3. Parámetros de las fórmulas de talud infinito

Parámetros		Significado
φ		Ángulo de fricción interna efectiva
β	Ángulo de la pendiente	Factor de seguridad
	Cohesión	c
γ_{sat}	Peso unitario del suelo saturado	Presión de los poros
γ		Peso unitario del suelo húmedo
Z_w		Profundidad a partir del nivel freático
γ'		Peso unitario efectivo bajo el nivel freático
Z		Profundidad del talud
k_h		Coefficiente sísmico horizontal

Tabla 3
Continuación

Parámetros	Significado
k_v	Coeficiente sísmico vertical
S_s	Fuerzas de estabilidad
W	Peso total del talud en toneladas
m	Relación de la profundidad del talud con la profundidad a partir del nivel freático
C_u	Esfuerzo de resistencia al corte
D	Espesor de la capa del suelo, mts
D_w	Espesor de la capa de suelo saturada, mts
C_r	Resistencia generada por las raíces de los arboles
q_o	Sobrecarga por el árbol
γ_w	Peso unitario del agua t/m ³

NOTA: Parámetros utilizados en la aplicación con su distinto significado. Adaptado por Juan Arévalo (2018), en base a las ecuaciones del 1 al 8.

7.3.1. Para un suelo seco y sin cohesión.

Esta fórmula corresponde a la expresada en la Ecuación 1. En esta fórmula se tiene en cuenta distintas características; como primero, que la cohesión sea igual a cero, la presión de los poros sea cero, el ángulo de fricción interna sea distinto a cero, que la masa deslizada sea de pequeño espesor, la superficie de falla sea plana y paralela al talud. Para esta fórmula se divide la tangente del ángulo de fricción interna con la tangente del ángulo de la pendiente. La fórmula presente es mencionada en el libro “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales” de Jaime Suárez (1998).

$$F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \quad 1$$

7.3.2. Esfuerzos totales

Los esfuerzos totales vendrían siendo la suma de los esfuerzos efectivos y neutros. En la Ecuación 2 (Escobar et al., 2016) se expresa el uso de la suma de estos esfuerzos donde el numerador son los esfuerzos totales.

$$Fs = \frac{C^u}{\gamma * Z * \sin\beta * \cos\beta} \quad 2$$

7.3.3. Saturado y con cohesión.

La fórmula mencionada corresponde a la Ecuación 3, en esta fórmula se tiene en cuenta que el suelo se encuentre saturado y la cohesión sea distinta a cero. En la presente ecuación en el numerador se le suma a la cohesión el producto de la multiplicación de la tangente del ángulo de fricción interna con la multiplicación de la profundidad del talud, el peso unitario del suelo saturado y el coseno cuadrado de la pendiente menos la presión de los poros; esto se divide entre el producto de la profundidad del talud multiplicado por el peso unitario del suelo saturado, el seno y coseno de la pendiente. La fórmula presente es mencionada en el libro “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales” de Jaime Suárez (1998).

$$Fs = \frac{c + (Z * \gamma^{sat} * \cos^2\beta - u) * \tan\phi}{Z * \gamma^{sat} * \sin\beta * \cos\beta} \quad 3$$

7.3.4. Esfuerzos efectivos con cohesión igual a cero

En cuanto a los esfuerzos efectivos, se menciona que son “la diferencia entre el esfuerzo total en cualquier dirección y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo”. Estas ecuaciones de esfuerzos efectivos son utilizadas por Escobar y Duque en el libro Geotecnia para el Trópico Andino y son variaciones que provienen de la ecuación general de talud infinito (2016). En la Ecuación 4 se expresa una variante de la ecuación general en donde se le adiciona el parámetro de la presión de los poros y se toma como supuesto que la cohesión es equivalente a cero.

$$Fs = \left(1 - \frac{u}{\gamma * Z * \cos^2\beta}\right) \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} \quad 4$$

7.3.5. Esfuerzos efectivos con cohesión igual a cero y flujo paralelo a la superficie

En la Ecuación 5 (Escobar *et al.*, 2016) no solo se parte de la suposición de un suelo con cohesión cero, sino que además el poseer un flujo paralelo a la superficie del terreno. En este caso no se

tienen en cuenta la presión de los poros pero se le adicionan los parámetros de pesos unitarios de forma más específica y una profundidad a partir del nivel freático.

$$F_S = \left(1 - m * \frac{\gamma_{sat}}{\gamma}\right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad 5$$

7.3.6. Ecuación general

Como última fórmula se tiene la Ecuación 6, la cual es utilizada por Jaime Suárez (1998). Dicha ecuación presenta distintos tipos de parámetros que ya se han requerido con anterioridad como lo es la cohesión, ángulo de la pendiente, peso unitario del suelo saturado, peso unitario del suelo húmedo, ángulo de reposo, profundidad a partir del nivel freático y los reúne en una sola ecuación.

$$F_S = \frac{c + [(1-m)\gamma + m\gamma_{sat} - m\gamma_w]z \cos^2 \beta \tan \phi}{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]z \sin \beta \cos \beta} \quad 6$$

7.3.7. Con presencia de sobrecargas de árboles

La Ecuación 7, es utilizada por Hammond, Hall, Miller y Swetik en el libro “Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0” (1992) En la fuente en cuestión también explican el significado de cada parámetro, donde se ve involucrado el ángulo de la pendiente, el ángulo de reposo, el espesor de la capa del suelo, el espesor de la capa de suelo saturada, el peso unitario del suelo húmedo y el del saturado, la cohesión, la resistencia de los árboles y el valor de sobrecarga generado por el árbol. Estos valores mencionados se pueden ver de forma más sencilla en la Figura 2.

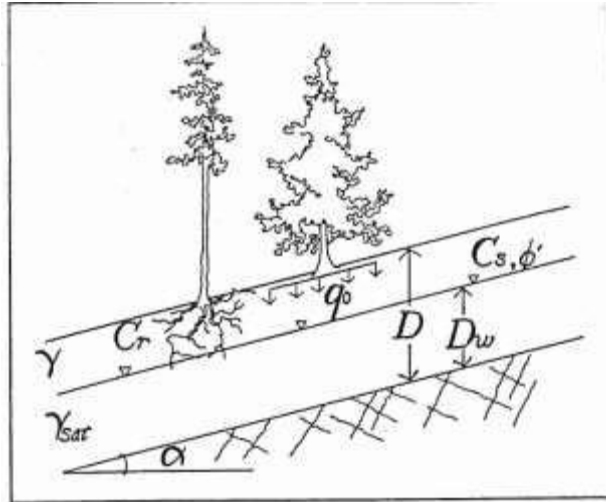


Figura 2. Representación gráfica de los parámetros empleados en la fórmula. Tomado de “Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for versión 2.0”, por Hammond et al, 1992.

$$FS = \frac{C_r + c + \cos^2(\beta)[q_0 + \gamma(D - D_w) + (\gamma_{sat} - \gamma)D_w] \tan(\phi)}{\sin(\beta) \cos(\beta)[q_0 + \gamma(D - D_w) + \gamma_{sat}D_w]} \quad 7$$

7.3.8. Presencia de coeficientes sísmicos pseudoestáticos.

En lo que corresponde a la fórmula en cuestión, la cual se representa en la Ecuación 8, se tiene en cuenta diversos tipos de parámetros, donde los más notorios son los coeficientes sísmicos pseudoestáticos horizontales y verticales. Estos coeficientes se utilizan para determinar la influencia que podría tener las fuerzas tanto horizontales como verticales de la inercia producida por un sismo.

La siguiente ecuación, la cual es utilizada por Skempton en el 1957 como una ecuación para determinar el factor de seguridad por el método de talud infinito incluye no solo los mencionados coeficientes sísmicos pseudoestáticos, además incluye el uso de fuerzas de estabilidad y otros valores comunes en el talud infinito (Muscolino, 2015).

$$FS = \frac{\frac{\cos\beta c}{[\gamma Z_w + \gamma'(Z - Z_w)] \sin\beta + \gamma_{sat}(Z - Z_w) \sin\beta + k_v W \sin\beta \cos\beta + k_h W \cos\beta - S_s} + \{[\gamma Z + \gamma'(Z - Z_w)] \cos\beta - k_h W \sin\beta - k_v W \cos\beta\} \tan\phi'_w}{[\gamma Z_w + \gamma'(Z - Z_w)] \sin\beta + \gamma_{sat}(Z - Z_w) \sin\beta + k_v W \sin\beta \cos\beta + k_h W \cos\beta - S_s} \quad 8$$

7.4. Implementación de las ecuaciones.

Ya con las definiciones anteriores se puede hacer una idea sobre conceptos temáticos del trabajo sobre el factor de seguridad, las formulas y entre otros; sin embargo, algo muy importante a tratar es todo el tema de informática que se requirió para poder llevar a cabo este trabajo, Donde el software utilizado fue MATLAB, el cual es un software diseñado para realizar distintos tipos de procesos matemáticos y de programación en un ambiente sencillo para el usuario. Aunque el software fue creado originalmente para dar solución a problemas matriciales, con el paso del tiempo se le han ido agregando cada vez más funciones. Actualmente el programa sirve para “realizar cálculos numéricos, desarrollo de algoritmos, modelo, simulación y prueba de prototipos, análisis de datos, exploración y visualización, gráficas de datos con interés científico o de ingeniería, desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario” (Esqueda, 2002)

Como primera medida se decidió realizar un *script* en MATLAB en el que se realizó una primera versión del algoritmo, donde para llevar a cabo dicha tarea se utilizaron los comandos que se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Comandos del script.

Comando	Función
Disp	Despliega un texto en el la ventana de comandos.
Pause	Genera una pausa por una determinada cantidad de tiempo antes de seguir ejecutándose el código.
Input	Guarda un valor o un caracter ingresado por el usuario en una variable.
While	Ejecuta el código mientras la afirmación sentenciada en el while sea verdadera.
Switch	Lee una variable y dependiendo de los valores de dicha variable se ejecutan posteriormente los casos en los que el valor sea enunciado.
If	Si la afirmación posterior es verdadera se ejecuta lo contenido en dicha secuencia.
Plot	Grafica una variable.
Grid on	Activa la grilla en la gráfica.

NOTA: Descripción de los distintos comandos utilizados en el Script. Tomado de MATLAB Con Aplicaciones a la Ingeniería, Física y Finanzas. Por Báez et al. 1998.

A su vez dentro del MATLAB existen distintas herramientas que permiten realizar distintas tareas, entre ellas una herramienta que se utilizó para generar el algoritmo, llamada “*App Designer*”, la cual permite la creación de una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés) utilizando el lenguaje de programación de MATLAB en un entorno tan sencillo como para poder crear funciones, casillas donde colocar datos de ingreso, así como la creación de gráficas, arrastrando un ícono desde la interfaz del *App Designer*.

El uso de *App Designer* permite el manejo simultáneo del componente visual de la aplicación como los componentes de programación que definen el comportamiento de esta. Al mover un componente visual que ofrece como un botón, medidor, gráfica o tabla se va generando a la par el código necesario para que ésta funcione permitiendo que se le asignen distintos valores y relaciones entre un recurso y otro. (Báez *et al.*, 2012)

En la programación dentro del *App Designer* se requiere constantemente el uso de herramientas llamadas *callbacks* que están definidas como “Una acción que lleva a cabo un objeto de la GUI cuando el usuario lo active” (Báez *et al.*, 2012)

7.5. Marco Legal:

Tabla 5. Marco legal del proyecto.

Norma	Concepto
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
Decreto 3600 de 2007	Por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones
Decreto 510 de 2011	Por el cual se adoptan las directrices para la formulación del Plan de Acción para la Atención de la Emergencia y la Mitigación de sus efectos
Decreto 020 de 2011	Por el cual se declara el Estado de Emergencia Económica, Social y Ecológica por razón de grave calamidad pública
Decreto 125 de 2011	Por el cual se crea el Programa Especial de Reforestación y se dictan otras disposiciones en desarrollo del Decreto número 020 de 2011

Decreto 1807 de 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
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible
Resolución 421 de 2014	Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para los proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos y se toman otras determinaciones

NOTA: Legislación ambiental relacionada en base a la normatividad vigente. Por Juan Arévalo, 2018.

8. Metodología

Para llevar a cabo el algoritmo de simulación que permitiese determinar la susceptibilidad de los suelos a los procesos de remoción en masa utilizando el método de talud infinito por medio del software MATLAB, se requirió diversos tipos de procedimientos, fórmulas y pasos que se encuentran resumidos en la Figura 3. El proyecto se dividió en 4 fases que fueron: Búsqueda de la información e identificación de parámetros, Implementación de las fórmulas en MATLAB, obtención de datos para probar el programa y la ejecución del algoritmo.

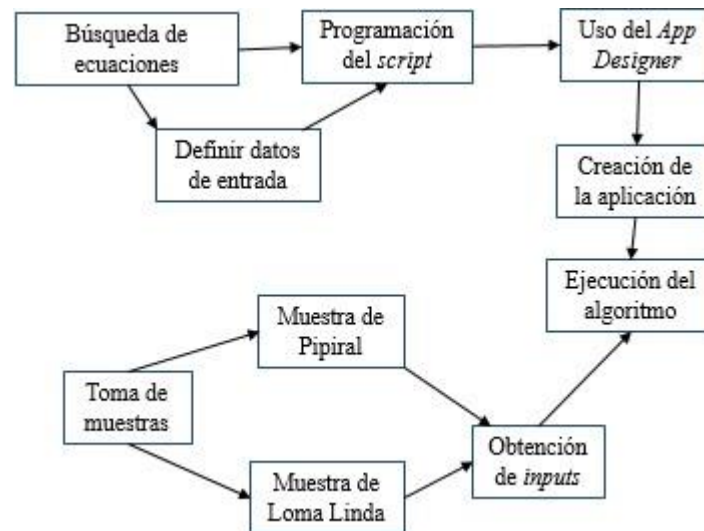


Figura 3. Diagrama de la metodología empleada para la construcción del Software. Elaborado por: Juan Arévalo, 2018.

8.1. Fase 1: Búsqueda de información e identificación de parámetros

Para la fase 1, la cual se basó en la búsqueda de todo tipo de parámetros, procedimientos y fórmulas necesarias para determinar la ejecución del método, se buscó y se profundizó con base a trabajos académicos en las que se hubiese implementado dicho método, en diapositivas y en gran tipo de trabajos disponibles en la web para buscar posibles fórmulas capaces de alimentar el programa.

Se identificó las distintas entradas o “inputs” que se requirieron con base a las distintas fórmulas por las que se determinaría el factor de seguridad para posteriormente ser modeladas. A pesar de

que existen diversos tipos de fórmulas para poder determinar el proceso de remoción en masa, se optó por utilizar la Ecuación 6 para el cálculo del factor de seguridad, debido a que los distintos parámetros son relativamente fáciles de medir y al ser la ecuación general su uso es aplicable para la mayoría de los casos de talud infinito.

8.2. Fase 2: Implementación de las fórmulas en MATLAB

Se procedió a codificar las fórmulas en un programa que permitiese la creación del algoritmo de simulación. El programa empleado fue MATLAB, debido a su facilidad para generar distintos algoritmos y códigos de programación sin necesidad de requerir ser un experto en el tema. En un principio se creó un *script* en donde se realizó una primera versión del algoritmo para posteriormente utilizar una herramienta llamada *App Designer* con el objetivo de crear la aplicación que sería el resultado final del algoritmo.

8.3. Fase 3: Obtención de los datos para probar el programa

Se obtuvo datos experimentales que pudiesen ser usados como datos de entrada para ejecutar el programa. Para ello se realizaron dos tomas de muestras con el fin de recolectar datos; la primera muestra se realizó en la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio Campus Loma Linda y la segunda en un sector de la antigua vía Bogotá anterior al Peaje de Pipiral. Para elegir dichos sectores se tuvo en cuenta el fácil acceso a dicha zona, que tuviese pendientes superiores a los 10° y que no presentase mucha vegetación.

8.3.1. Obtención de muestras

El objetivo era tomar muestras de distintos horizontes del suelo al cavar una calicata de 3 metros de profundidad, no obstante por cuestiones de clima, tiempo y dificultad de romper una capa de rocas no se pudo llegar a la profundidad deseada siendo en Loma Linda la excavación de 60 centímetros y en Pipiral de 30 centímetros, donde se tomó una muestra de distintas partes de la calicata.

8.3.2. Obtención de las alturas

Posterior a la toma de muestras, se registró la altitud con un GPS en la parte alta del talud, luego se midió con un decámetro una distancia colina abajo y se tomó otra medida de altura con el fin de poder calcular la pendiente.

Una vez realizadas las distintas mediciones, por medio de las alturas determinadas con el GPS y la distancia entre las alturas se utilizó el teorema de Pitágoras al tener la distancia de lo que sería la hipotenusa y un cateto que vendría siendo la diferencia de dichas alturas.

8.3.3. Transporte de muestras

Las muestras fueron transportadas siguiendo la norma colombiana I.N.V. E – 103 (Instituto Nacional de Vías s.f.) la cual establece que para el caso de muestras de suelos usadas para ensayos de humedad, pesos específicos y entre otros parámetros, se recomienda que las muestras sean guardadas en recipientes o empaques a prueba de humedad, como lo serían bolsas plásticas, frascos de vidrio o plástico. El recipiente que se utilizó fue bolsas plásticas de un grosor suficiente para que no se rompan y dejándolas bien cerradas expulsando todo el aire posible de su interior.

8.3.4. Obtención de datos para calcular el ángulo de fricción interna

Una vez se obtuvo las dos muestras y las mediciones de campo, se llevaron al laboratorio donde se apartó 100 ml de muestra de suelo para ser tamizada con el objetivo que de esa forma fuese más fácil que pasara por el embudo. Posteriormente se colocó el embudo en una base donde medía 10 centímetros de altura desde la salida del embudo hasta la mesa; dicho embudo y base se colocaron sobre una cartulina y se dispuso a agregar la muestra del suelo en el embudo para posteriormente marcar hasta donde llegaba la muestra de suelo en la cartulina generando un círculo. Los pasos se repitieron 3 veces y luego se le agregó un borrador de una medida de 2,6 cm debajo de cada pata de la base con el objetivo de modificar la altura para luego ser repetido el procedimiento otras 3 veces con ambas muestras.

Posteriormente se midieron 4 diámetros distintos de cada círculo generado sobre la cartulina y se anotó su radio, donde se promedió y sacó la desviación estándar y por medio de la formula se sacó el ángulo de fricción interna.

8.3.5. Medición del peso volumétrico

Al mismo tiempo se puso una muestra de suelo en un recipiente de porcelana, se pesó primero la porcelana sola y luego con la muestra y se colocó en un horno ambas muestras durante aproximadamente 3 horas con el fin de secar la muestra para ser pesada de nuevo. Para el peso volumétrico saturado y húmedo se utilizó los distintos pesos medidos, donde se tomó el peso de cada muestra y se dividió por el volumen de 100 ml del vaso precipitado.

8.3.6. Obtención del valor de la cohesión

En cuanto a la cohesión del suelo se utilizaron unas tablas referenciales utilizadas por los autores Rodríguez, Serra y Oteo en el libro “Curso aplicado de cimentaciones” (1982) que expresan ciertas propiedades, características y parámetros de distintos tipos de suelo en base a diversas características como el tipo de suelo, la cohesión, entre otros. De esas tablas se decidió tomar los datos descritos para la cohesión encontrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Características medias de los suelos para anteproyectos (EAU-1970).

Clase de suelo	Peso Especifico		Valores de calculo			Coeficiente de compresibilidad E (t/m²)
	Emergido (t/m³)	Sumergido (t/m³)	Resistencia final Ángulo de rozamiento (grados)	Resistencia inicial Cohesión (t/m²)	Resistencia al corte sin drenaje (t/m²)	
Suelos no cohesivos						
Arena suelta, redondeada	1,8	1,0	30	-	-	2.000 – 5.000
Arena suelta, angulosa	1,8	1,0	32,5	-	-	4.000 – 8.000
Arena semidensa redondeada	1,9	1,1	32,5	-	-	5.000 – 10.000
Arena semidensa angulosa	1,9	1,1	35	-	-	8.000 – 15.000
Grava sin arena	1,6	1,0	37,5	-	-	10.000 – 20.000
Grava gruesa, angulosa	1,8	1,1	40	-	-	15.000 – 30.000
Suelos cohesivos	(Valores empíricos para muestras inalteradas de la zona norte alemana)					
Arcilla semidura	1,9	0,9	25	2,5	5-10	500 – 1.000
Arcilla difícil de moldear, dura	1,8	0,8	20	2	2,5-5	250 – 500
Arcilla moldeable, blanda	1,7	0,7	17,5	1	1-2,5	100 – 250
Marga glacial, sólida	2,2	1,2	30	2,5	20-70	3.000 – 10.000

Tabla 6
Continuación

Clase de suelo	Peso Especifico		Valores de calculo			Coeficiente de compresibilidad E (t/m ²)
	Emergido (t/m ³)	Sumergido (t/m ³)	Resistencia Ángulo de rozamiento (grados)	Cohesión (t/m ²)	Resistencia inicial Resistencia al corte sin drenaje (t/m ²)	
Arcilla arenolimosa media	2,1	1,1	27,5	1	5-10	500 – 2.000
Arcilla arenolimosa blanda	1,9	0,9	27,5	-	1-2,5	400 – 800
Limo	1,8	0,8	27,5	-	1-5	300 – 1.000
Sedimento ligeramente arcilloso, orgánico, blando	1,7	0,7	20	1	1-2,5	200 - 500
Sedimento muy arcilloso, fuertemente orgánico, blando	1,4	0,4	14	1,5	1-2	50 – 300
Turba	1,1	0,1	15	0,5	-	40 – 100
Turba moderadamente preconsolidada	1,3	0,3	15	1	-	80 - 200

NOTA: Valores medios de suelo de peso específico, resistencias y coeficiente de compresibilidad en base a distintos tipos de suelo. Tomado de Curso aplicado de cimentaciones, por Rodríguez et al. 1982.

Para determinar el tipo de suelo al que pertenecía tanto la muestra tomada en Loma Linda como cerca de Pipiral, se dispuso a utilizar un mapa de geología del departamento del Meta (Instituto Geográfico Agustín Coazzi, 2004), en donde se puede evidenciar que el tipo de suelo perteneciente al sector de Loma Linda es “Abanicos aluviales de piedemonte: Bloque y gravas, soportados en matriz limo-arenosa localmente arcillosa. Los bloques son subangulares y subredondeados, principalmente de cuarzo arenita de grano medio a conglomerático y calizas. (Qab)(Arcilla arenolimosa media)” y para el sector de Pipiral es “Areniscas cuarzosas a calcáreas con intercalaciones de limolitas y arcillolitas (Pzsm)”.

En base a lo anterior se decidió tomar para Loma Linda lo correspondiente a “Arcilla areno limosa media” y para Pipiral “Arcilla moldeable, blanda” dado a que son las características más cercanas a las propiedades de los suelos en cuestión; donde, para ambos casos se tomó el valor de la cohesión igual a 1 como indica la Tabla 6.

Con respecto a la resistencia de las raíces y la sobrecarga del árbol no se tuvo en cuenta debido a que se realizó la toma de muestras en una zona donde no se encontraban árboles que pudiesen influir en los resultados.

8.3.7. Obtención del valor de las profundidades.

Debido a la dificultad generada al momento de perforar la roca del suelo de manera experimental no se pudo determinar el valor de la profundidad del suelo en ambos casos, por lo que se dispuso a utilizar valores referenciales de profundidades del suelo en base a estudios realizados por INGEOMINAS (2002) en la ciudad de Villavicencio, donde se tomaron valores de una profundidad del talud de 2 metros y una profundidad a partir del nivel freático de 1 metro.

8.4. Fase 4: Codificación, depuración y prueba del algoritmo

Se codifican las diferentes ecuaciones en el lenguaje de programación Matlab, depurando las diferentes líneas de código para que no ocurran problemas de codificación. Una vez las secuencias de cálculo se ejecutan sin fallas, se usan los distintos datos obtenidos anteriormente para así probar el funcionamiento del algoritmo y calcular el factor de seguridad en las zonas seleccionadas.

9. Resultados

9.1. Búsqueda de fórmulas e identificación de *inputs*

A pesar de que en total se encontraron 8 fórmulas distintas para determinar el factor de seguridad, en muchos casos dichas fórmulas compartían varios parámetros por tratarse del mismo método, incluso se pudo notar que en todas las 8 fórmulas es necesario disponer del valor de la pendiente, en 7 fórmulas el valor del ángulo de fricción interna, los demás parámetros que se identificaron como *inputs* para llevar a cabo el algoritmo en su totalidad son la cohesión, profundidad del talud, peso unitario del suelo saturado, presión de los poros, profundidad a partir del nivel freático, peso unitario del suelo insaturado, peso unitario efectivo bajo el nivel freático, peso total del talud, coeficiente sísmico vertical, coeficiente sísmico horizontal, valor de las fuerzas de estabilidad, esfuerzo de resistencia al corte, valor de la resistencia de las raíces de los árboles y valor de la sobrecarga generada por el árbol.

9.2. Generación del programa

Se creó un *script* en el cual se dividieron las 8 fórmulas en 4 categorías las cuales corresponden a “para un suelo con o sin cohesión”, “con presencia de coeficientes sísmicos pseudoestáticos”, “según esfuerzos efectivos o esfuerzos totales” y “teniendo en cuenta sobrecargas de árboles o por la ecuación general”.

Posteriormente se dividieron las fórmulas en las categorías mencionadas, en 3 de dichas categorías se hizo una subdivisión siendo la única sin esta “con presencia de coeficiente sísmicos pseudoestáticos” debido a que solamente se dispuso de una fórmula relacionada a este parámetro. En cuanto al código en un principio se utilizó el comando *disp* junto con el *pause* para explicarle al usuario de qué se trata el programa y realizarle distintos tipos de indicaciones para poder elegir la fórmula deseada. Se utilizó la variable contador a la que se le asignó un número por un input del usuario para que el programa fuese ejecutado las veces que el usuario requiriera guardando el resultado para al finalizar generar una gráfica, estos resultados serían guardados en variables

llamadas fs1, 2,3...10 las cuales utilizaban la variable contador para irse rotando la cantidad de veces necesaria.

Una vez se tuviesen las fórmulas debidamente representadas en el *script* se dispuso a crear una variable llamada gráfica, en la cual se le iban asignando valores de los distintos factores de seguridad almacenados dependiendo de la cantidad de veces que se había ejecutado el programa, con el fin de poder hacer una comparación clara al momento de analizar los distintos datos.

Finalizada la creación del *script* se procedió a utilizar la herramienta *App Designer* con el objetivo de crear la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI por sus siglas en inglés). En la interface gráfica se dividió la aplicación en 4 pestañas, la primera donde se selecciona el método que se deseara utilizar, la segunda donde se le pide al usuario el ingreso de los datos para los distintos *inputs* que requiere la fórmula seleccionada, en la tercera pestaña se representan los distintos resultados del factor de seguridad conforme al ir ejecutando la aplicación, y finalmente la cuarta pestaña corresponde al lugar donde se grafican dichos resultados.

El algoritmo se exportó en forma de aplicación de MATLAB como un archivo con extensión *.mlappinstall* que para su uso requiere abrir el MATLAB, dirigirse a la pestaña “APPS”, seleccionar el botón “*Install App*” y seleccionar el archivo, cuando se requiera su uso éste aparecerá entre las *APPs* disponibles sin necesidad de volver a hacer estos pasos nuevamente.

La aplicación está dividida en varias pestañas, donde la primera pestaña se denomina “Seleccione el método” como se observa en la Figura 4; en dicha pestaña se encuentran dividido los distintos tipos de fórmulas en 4 secciones que son “Para un suelo con cohesión o sin esta”, “Con presencia de coeficientes sísmicos pseudoestáticos”, “Con esfuerzos efectivos o esfuerzos totales” y “Con sobrecargas de árboles o ecuación general”. A su vez estas pestañas en algunos casos se dividen en 2 o 3 sub fórmulas a excepción de la segunda clasificación que en ese caso solo es una fórmula.

UI Figure

1) Seleccione el método 2) Introduzca los datos 3) Resultados 4) Susceptibilidad

FACTOR DE SEGURIDAD POR MEDIO DEL MÉTODO DE TALUD INFINITO

Seleccione a continuación el método que desea ser ejecutado, solo puede haber un mismo método activo a la vez, de forma que si desea cambiar de método el anterior tiene que volver a la opción "Seleccione en caso de usar este método"

Para un suelo con cohesión o sin esta:

Con presencia de coeficientes sísmicos pseudo estáticos:

Con esfuerzos efectivos o esfuerzos totales:

Con sobrecargas de arboles y ecuación general:

Figura 4. Primera sección del algoritmo de simulación. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

A continuación se introducen los datos en la segunda pestaña denominada “Introduzca los datos”, como se muestra en un ejemplo en la Figura 5; una vez se seleccionado la metodología que se desea utilizar en la pestaña uno. En esta pestaña lo primero que se ha de hacer es presionar el botón que dice “Presione acá para que le aparezcan que variables debe ingresar” con el objetivo de realizar lo que el propio botón menciona, lo cual se expresa en las casillas de abajo y en los casos que la fórmula requiera menos variables del total de casillas disponibles el propio programa le avisará al usuario que esa casilla no aplica para el método requerido.

UI Figure

1) Seleccione el método 2) Introduzca los datos 3) Resultados 4) Susceptibilidad

Presione acá para que le aparezcan que variables debe ingresar

Ángulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados	0	Ángulo de la pendiente en grados	0
No aplica	0	No aplica	0
No aplica	0	No aplica	0
No aplica	0	No aplica	0
No aplica	0	No aplica	0
No aplica	0	No aplica	0

Figura 5. Segunda sección del algoritmo de simulación. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

La siguiente pestaña en cuestión es la tercera, que se denomina “Resultados” la cual se muestra con un ejemplo en la Figura 6; en esta ventana se puede evidenciar un botón que dice “Pulse acá para determinar el factor de seguridad”, unas casillas donde se muestra el factor de seguridad encontrado, abajo el número de datos guardados en el programa durante esta sesión y a la derecha todos los distintos resultados almacenados pudiendo llegar a almacenar un total de 10 resultados.

Figura 6. Tercera sección del algoritmo de simulación. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

Para finalizar, la última pestaña denominada “Susceptibilidad”, como se puede evidenciar con un ejemplo en la Figura 7, esta pestaña se encuentra constituida por un botón, una casilla correspondiente a cada cuadro y un rango en el que se explica los valores representativos para cada grado de susceptibilidad según la Guía Metodológica Colombiana para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano (Ávila *et al*, 2016).

En esta pestaña al momento de pulsar el botón, el programa determina si los distintos resultados poseen una susceptibilidad alta, media o baja en torno al valor del factor de seguridad calculado, donde, en caso de que no se hubiese calculado un factor de seguridad para un resultado, por defecto aparecerán las palabras “No aplica”.

Figura 7. Cuarta sección del algoritmo de simulación. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

Una vez el usuario haya ingresado las variables requeridas y se haya calculado el factor de seguridad utilizando el método deseado, en caso de querer utilizar la aplicación otra vez usando el mismo método lo único que debería hacer es devolverse a la pestaña donde se introducir los datos y cambiarlos con las nuevas variables; si por el contrario desea comparar el resultado con otro método distinto deberá devolverse a la primera pestaña, colocar la pestaña del método utilizado en la opción “Seleccione en caso de usar este método” (de otra forma el programa seguirá el primer método seleccionado de arriba abajo) y posteriormente seleccionar el nuevo método buscado, volver a oprimir el botón de la segunda pestaña para que cambien las variables e introducirlas en la tercera.

Al utilizar el *App Designer* posee dos tipos de vistas, una vista de diseño y una de código. Ambas vistas están relacionadas entre sí en donde se utiliza la vista de diseño para utilizar las herramientas que da el programa mientras se va generando código automáticamente en la otra vista.

Cada objeto que se implemente en la vista de diseño está ligado a un código, donde se pueden hacer “callbacks” para asignar distintas funciones dependiendo a las distintas interacciones que provea el objeto, por ejemplo al ser pulsado un botón, al ser seleccionada una casilla o incluso con solo que haya un cambio en los valores de un cuadro de texto o numérico.

Por ello el algoritmo se basa su función en la creación de *callbacks*, principalmente al ser pulsado los botones junto a una serie de funciones condicionantes para determinar si una casilla debe modificarse, si debe aparecer un texto o quedar en blanco, entre otros. En un principio cuando se pide al usuario que seleccione un tipo de método como se ve en la Figura 6, al momento que uno de estos valores es modificado, el programa guarda esta modificación como un condicionante, el cual es lo primero que se revisa al momento de que el usuario presiona el botón en la pestaña “Introduzca los datos”.

El botón de la segunda pestaña hace un chequeo de cada una de las casillas de texto de dicha pestaña como lo muestra la Figura 8. Para determinar que variable es la que deba tener cada casilla con el objeto de ser utilizadas posteriormente, se genera un condicionante, donde si en la primera pestaña el valor de la lista asignada a la categoría “Para un suelo con cohesión o sin esta” tiene un valor de “Para un suelo seco y sin cohesión”, ese primer cuadro mostrará el texto “Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados”, que es la primera variable necesaria para poder llevar a cabo la fórmula solicitada y así sucesivamente con las demás listas. Si, por el contrario la única lista cuyo valor sea distinto a “Seleccione en caso de usar este método” fuese la necesaria para llevar a cabo la fórmula de esfuerzos totales, el texto que se desplegaría sería “Angulo de la pendiente en grados” dado a que la fórmula solicitada por ese método no requiere la variable del ángulo de reposo.

```

136 ~ % Botonar button pushed function
137 ~ function BotonarPushed(app)
138 ~     if isequal(app.sinconcohe.Value, 'Para un suelo seco y sin cohesión')
139 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados'
140 ~     elseif isequal(app.sinconcohe.Value, 'Para un suelo saturado y con cohesión')
141 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados'
142 ~     elseif isequal(app.simpseu.Value, 'Utilizando coeficientes sísmicos pseudo estáticos')
143 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados'
144 ~     elseif isequal(app.esfuerefetot.Value, 'Esfuerzos efectivos con cohesión cero')
145 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados'
146 ~     elseif isequal(app.esfuerefetot.Value, 'Esfuerzos efectivos con cohesión cero y flujo paralelo a la su
147 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados'
148 ~     elseif isequal(app.esfuerefetot.Value, 'Esfuerzos totales')
149 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de la pendiente en grados'
150 ~     elseif isequal(app.sobartgen.Value, 'Presencia de sobrecargas de árboles')
151 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados'
152 ~     elseif isequal(app.sobartgen.Value, 'Ecuación general')
153 ~         app.textvar1.Value = 'Angulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados'
154 ~     end
155 ~     if isequal(app.sinconcohe.Value, 'Para un suelo seco y sin cohesión')
156 ~         app.textvar2.Value = 'Angulo de la pendiente en grados'
157 ~     elseif isequal(app.sinconcohe.Value, 'Para un suelo saturado y con cohesión')
158 ~         app.textvar2.Value = 'Angulo de la pendiente en grados'
159 ~     elseif isequal(app.simpseu.Value, 'Utilizando coeficientes sísmicos pseudo estáticos')
160 ~         app.textvar2.Value = 'Angulo de la pendiente en grados'
161 ~     elseif isequal(app.esfuerefetot.Value, 'Esfuerzos efectivos con cohesión cero')
162 ~         app.textvar2.Value = 'Angulo de la pendiente en grados'

```

Figura 8. Código relacionado con las variables solicitadas. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

Por otro lado, cuando se presenta el caso que existan dos listas seleccionadas al mismo tiempo, el algoritmo se ejecutará utilizando la primera lista seleccionada de arriba a abajo, por ello es necesario que si se requiere cambiar de método una vez ya se utilizara la aplicación, tendría que cambiar la lista que se había utilizado en un principio a la casilla “Seleccione en caso de usar este método”.

Como no todas las fórmulas requieren la misma cantidad de parámetros llegando una incluso a ocupar solo 2, las casillas sobrantes siguen ejecutando la misma estructura pero en vez de asignársele un texto pidiendo el parámetro, el texto es remplazado por las palabras “No aplica” evitando que queden casillas vacías.

Prosiguiendo en el algoritmo, al momento de dirigirse a la tercera pestaña y pulsar el botón, el programa ejecuta un condicional que está ligado a las listas de la primera pestaña, donde se ejecutan los diversos cálculos requeridos para determinar el factor de seguridad dependiendo del método elegido como lo muestra la Figura 9.

Para que los resultados sean guardados por el programa existe la casilla que dice “Resultados guardados”, la cual para que se ejecute correctamente es necesario de la implementación de una serie de condicionantes que funcionan a modo de contador; de forma que cuando se calcula un resultado de factor de seguridad el valor de esta casilla incrementa en 1, con el objetivo que si el resultado de ese contador es 1 el factor de seguridad determinado se copie en la casilla “Resultado 1” y así sucesivamente con todos los resultados que se determinen para que no se sobrescriban y puedan ser graficados posteriormente.

```

145 function BetformPushed(app)
146     if isequal(app.sinconcohe.Value, 'Para un suelo seco y sin cohesión')
147         tanfric= tan(app.numvar1.Value);
148         tanpend= tan(app.numvar2.Value);
149         app.resfs.Value = tanfric/tanpend;
150         app.guardarfs.Value = app.guardarfs.Value + 1;
151         if app.guardarfs.Value ==1;
152             app.resultado1.Value = app.resfs.Value;
153         elseif app.guardarfs.Value ==2;
154             app.resultado2.Value = app.resfs.Value;
155         elseif app.guardarfs.Value ==3;
156             app.resultado3.Value = app.resfs.Value;
157         elseif app.guardarfs.Value ==4;
158             app.resultado4.Value = app.resfs.Value;
159         elseif app.guardarfs.Value ==5;
160             app.resultado5.Value = app.resfs.Value;
161         elseif app.guardarfs.Value ==6;
162             app.resultado6.Value = app.resfs.Value;
163         elseif app.guardarfs.Value ==7;
164             app.resultado7.Value = app.resfs.Value;
165         elseif app.guardarfs.Value ==8;
166             app.resultado8.Value = app.resfs.Value;
167         elseif app.guardarfs.Value ==9;
168             app.resultado9.Value = app.resfs.Value;
169         else
170             app.resultado10.Value = app.resfs.Value;
171         end
172     elseif isequal(app.sinconcohe.Value, 'Para un suelo saturado y con cohesión')

```

Figura 9. Código relacionado la aplicación de las fórmulas. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

La última *callback* que se realiza en el código es la que corresponde a la sección de la pestaña 4 y se evidencia en la Figura 10, en este caso dicha *callback* hace una comprobación donde determina en que rango se encuentra cada uno de los resultados previamente calculados para así ser expresado de forma clara al usuario.

```

671 % cualfs button pushed function
672 function cualfsButton(app)
673
674     if app.resultado1.Value < app.numalta.Value
675         app.sus1.Value = 'Alta'
676     elseif app.resultado1.Value > app.numbaja.Value
677         app.sus1.Value = 'Baja'
678     else
679         app.sus1.Value = 'Media'
680     end
681
682     if app.guardarfs.Value < 2
683         app.sus2.Value = 'No aplica'
684     else
685         if app.resultado2.Value < app.numalta.Value
686             app.sus2.Value = 'Alta'
687         elseif app.resultado2.Value > app.numbaja.Value
688             app.sus2.Value = 'Baja'
689         else
690             app.sus2.Value = 'Media'
691         end
692     end
693 end

```

Figura 10. Código relacionado con la determinación de la susceptibilidad. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

A pesar de que el proyecto está enfocado principalmente en su versión realizada en *App Designer*, también se generó como resultado la creación del script mencionado con anterioridad,

el cual al momento de ejecutarse se despliega en la sección de Ventana de Comandos del MATLAB, donde el usuario va seleccionando con números los métodos que desea utilizar, ingresa las variables que se requieren y genera una gráfica con todos los resultados. La principal diferencia con la versión de *App Designer* es la presentación de éste, más las funciones son las mismas. El código utilizado para la creación del *script* se puede encontrar en el Anexo 3.

9.3. Pruebas del algoritmo con bibliografía

Se utilizó el trabajo de grado titulado “Análisis comparativo de las metodologías de cálculo de estabilidad de taludes” (Curipoma, 2017) para tomar valores de parámetros necesarios para poder ejecutar la aplicación y comprobar los resultados obtenidos en ese trabajo con los encontrados utilizando el programa. En ambos casos se utilizó la fórmula del talud infinito; dichos parámetros son descritos en la Tabla 7. Los datos corresponden a los valores del “ejercicio 2” con respecto al talud “Las Piritas” en el documento mencionado.

Tabla 7. Características geotecnicas del talud "Las Piritas"

Parámetro	Valor
Ángulo de fricción interna (φ)	32°
Ángulo de la pendiente (β)	35°
Profundidad del talud (Z)	26m
Peso unitario del suelo saturado (γ_{sat})	17 KN / m3
Cohesión (c)	0.5 KN /m3
Presión de los poros (u)	0,25 T/m3

NOTA: Características del suelo en el talud “Las Piritas” al momento de realizar los cálculos del factor de seguridad. Tomado de Curipoma, 2017.

Se ejecutó el algoritmo seleccionando la ecuación a utilizar de las que dispone el algoritmo de simulación, la cual fue “Para un suelo saturado y con cohesión” debido a que esa misma ecuación es la que se utiliza para calcular el factor de seguridad por el método de talud finito en el trabajo de grado de Curipoma.

Se requirió pasar los datos de kilonewtons a toneladas, para ello se multiplicó los datos que lo requiriesen por 0,102, debido a los requerimientos de unidades del algoritmo se necesita que dichos datos se encuentren en T/m3. Una vez estuviesen todos los parámetros en las unidades que

requeridas por el algoritmo para esa ecuación, se dispuso a ingresarlos en la aplicación como lo muestra la Figura 11.

Figura 11. Ingreso de los parámetros del talud “Las Pitás”. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

Al ingresar los distintos parámetros en la aplicación, esta calculó un factor de seguridad total de 0,9709 el cual se encuentra cercano al factor de seguridad calculado en ese trabajo con esos datos y usando ese método, el cual corresponde a un valor de 0,911.

9.4. Implementación de las variables

Otro resultado del proyecto fue la obtención de datos por medio de la toma de muestras en dos puntos del municipio de Villavicencio, uno cercano al peaje de Pipiral y el otro tomado en la Universidad Santo Tomás sede Loma Linda.

En la Tabla 8 se puede evidenciar que datos se registraron para las distintas muestras de suelo, tanto en Loma Linda como en Pipiral además de las in situ y las de laboratorio.

Tabla 8. Parámetros tomados de manera experimental en los dos sitios seleccionados.

Parámetro	Loma Linda	Pipiral
Altura 1	493 msnm	894 msnm
Altura 2	489 msnm	889 msnm
Coordenadas	E01046838 N00946264	E01040205 N00956526
Distancia entre altura 1 y 2	22,5 metros	15 metros
Peso de la muestra en 100 ml	109,1 gramos	123,9 gramos
Peso de la muestra secada	89,9 gramos	103,3 gramos
Radio promedio altura 10cm	4,53333	3,983333
Radio promedio altura 12,6cm	4,96666	4,1
Angulo de reposo altura 1	69,5	72,342
Ángulo de reposo altura 2	71,7015	75,3236
Desviación estándar altura 1	0,10730867	0,2348436
Desviación estándar altura 2	0,31502766	0,08528029
Ángulo de la pendiente	10,2403°	19,4712°
Peso unitario húmedo	1,239 t/m ³	1,091 t/m ³
Peso unitario saturado	1,033 t/m ³	0,899 t/m ³
Profundidad del talud (m)	2	2
Profundidad a partir del nivel freático (m)	0.3	0.3
Cohesión (t/m ²)	1	1

NOTA: Valores de los parámetros tomados de manera experimental en los distintos lugares de toma de muestras.
Elaborado por Juan Arévalo, 2018.

De los datos registrados en la tabla anterior, se seleccionaron para ser registrados en el algoritmo: Profundidad del talud, Profundidad a partir del nivel freático, Ángulo de la pendiente, Peso unitario húmedo, Peso unitario saturado, Ángulo de reposo altura 1 (en Loma Linda), Ángulo de reposo altura 2(en Pipiral) y cohesión.

Con los distintos datos obtenidos, además de los análisis y parámetros explicados en la metodología, se pudo determinar un ejemplo de datos de entrada al programa; con lo que al ser ejecutado dicho programa se dieron los siguientes resultados expresados en la Figura 12

UI Figure

1) Seleccione el método 2) Introduzca los datos 3) Resultados 4) Susceptibilidad

Pulse acá para determinar el factor de seguridad

Factor de seguridad: 0.913

Resultados guardados: 2

Resultado	Valor
Resultado 1	1.164
Resultado 2	0.913
Resultado 3	0
Resultado 4	0
Resultado 5	0
Resultado 6	0
Resultado 7	0
Resultado 8	0
Resultado 9	0
Resultado 10	0

Figura 12. Resultados de la implementación de los datos obtenidos. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

Siendo Resultado 1 el producto de los datos de la muestra de Loma Linda con un factor de seguridad del 1,164 y Resultado 2 el de Pipiral con un factor de seguridad del 0,913.

No se encontraron problemas de ejecución durante las pruebas iniciales del programa, el algoritmo exigió al usuario los distintos parámetros que este requería para ser ejecutado como lo indica la Figura 13.

UI Figure

1) Seleccione el método 2) Introduzca los datos 3) Resultados 4) Susceptibilidad

Pulse acá para que le aparezcan que variables debe ingresar

Variable	Valor
Ángulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados	75.33
Ángulo de la pendiente en grados	19.47
Profundidad del talud en metros	2
Peso unitario del suelo saturado en tm3	0.999
Peso unitario del suelo húmedo en tm3	1.091
Cohesión en tm2	1
profundidad a partir del nivel freático en metros	0.3
No aplica	0
No aplica	0
No aplica	0

Figura 13. Datos ingresados para la muestra de Pipiral. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

Una vez se ha determinado el factor de seguridad en la pestaña 3, tanto para Pipiral como para Loma Linda, se utilizó la pestaña 4 donde al momento de presionar el botón la aplicación determinó que en ambos casos la susceptibilidad era baja tal como lo muestra la Figura 14.

Figura 14. Susceptibilidad a la remoción en masa. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

En definitiva los variables que se ingresaron en la aplicación están escritos en la Tabla 9 junto al factor de seguridad obtenido.

Tabla 9. Variables ingresadas y factor de seguridad obtenido.

Muestra	Pendiente (grados)	Ángulo de fricción interna (grados)	Profundidad del talud (m)	Profundidad a partir del nivel freático (m)	Cohesión (t/m ²)	Peso unitario del suelo húmedo (t/m ³)	Peso unitario del suelo saturado (t/m ³)	Factor de seguridad
Loma Linda	10,24	69,50	2	0.3	0,3	1,239	1,033	1,164
Pipiral	19,47	75,33	2	0.3	0,3	1,091	0,899	0,913

Nota: Valores de las variables que se ingresaron en el algoritmo junto al valor del factor de seguridad obtenido en cada caso. Elaborado por Juan Arévalo, 2018.

Si bien el algoritmo se probó con los datos evidenciados anteriormente resultantes del muestreo de Loma Linda y Pipiral, si así se requiriese se podría crear una base de datos con distintos muestreos de diferentes zonas a través de una determinada zona geográfica al utilizar el

mismo programa usando las ecuaciones ofrecidas por el modelo que más se adecuen a las distintas zonas.

9.5. Susceptibilidad a la remoción en masa en Loma Linda

La zona de muestreo correspondiente a Loma Linda (Anexo 1) al momento de ejecutar el programa obtuvo un factor de seguridad del 1,164. De acuerdo a la Tabla 2, donde se menciona la susceptibilidad a la remoción en masa teniendo en cuenta el factor de seguridad, se puede observar que al obtenerse un resultado superior a 1,1 y menor a 1,5 Loma Linda se encuentra en la categoría de susceptibilidad media. A pesar de que en el lugar donde se realizó la calicata solo se encuentra un árbol en un radio de 5 metros, el talud posee una abundante cobertura vegetal de herbáceas que aportan estabilidad al talud tanto por su aporte al reducir el impacto del agua al caer, así como por el aporte radicular. En la parte más alta del talud donde empieza la sede de la Universidad se encuentran plantas arbóreas lo que reforzaría la estabilidad del talud, además de que al ser la zona del talud donde se encuentra la mayor pendiente un lugar con acceso restringido al público en general, la intervención antrópica en el talud es baja con lo que el valor proporcionado por el algoritmo sería un valor preliminar cercano a la realidad.

9.6. Susceptibilidad a la remoción en masa en la zona de muestreo de Pipiral

La zona de muestreo correspondiente a Pipiral (Anexo 2) con la ejecución del programa el resultado generado fue de un factor de seguridad de 0,913. A diferencia de Loma Linda el resultado dio un número inferior a 1,1 por lo que sería un talud que entraría en la categoría alta susceptibilidad a la remoción en masa de acuerdo a la Tabla 2 como lo presenta la cuarta pestaña del programa Tabla 2. A diferencia de Loma Linda, la zona de muestreo de Pipiral el talud se encuentra junto a una cárcava con material desprendido en la parte baja del talud junto a la malla vial como se evidencia en la Figura 15, la cobertura vegetal del suelo, es en su mayoría gramíneas en gran parte del talud con algunas especies arbóreas en la parte baja junto a la malla vial y donde finaliza el predio, además de poseer una pendiente notoriamente mayor a la presentada en Loma Linda. Dado a las anteriores características del talud mencionadas se esperaría que el factor de seguridad fuese relativamente bajo tal y como lo evidenció el programa.



Figura 15. Material desprendido en el talud de muestreo. Fuente: Juan Arévalo, 2018.

En lo respectivo a impactos socio-ambientales del talud se puede ver una clara erosión del suelo que conllevó a la creación de una cárcava al lado del talud que de no controlarse podría llegar a generar un mayor movimiento en masa que bloquee la vía perjudicando a los vehículos que transitan la vía, a los dueños tanto del predio en el que se genera el deslizamiento como al dueño del predio frente a este, a los habitantes locales y la cobertura vegetal que se encuentre colina abajo del talud. La susceptibilidad generada por la erosión del suelo en el talud podría mejorarse al implementarse distintas obras de bioingeniería que permitan generar una mayor estabilidad del talud junto a otros métodos de estabilidad de taludes.

Conclusiones

El programa de simulación se generó de manera satisfactoria, el cual consta de diferentes fórmulas que actúan con distintos tipos de variables y de suelos. Estas fórmulas al ser ejecutadas por el programa de simulación permiten determinar el factor de seguridad de forma rápida y sencilla para el usuario tanto si se poseen conocimientos de suelos como si no, siguiendo distintos tipos de fórmulas que corresponden a lo planteado por el método de talud infinito.

Las distintas fórmulas identificadas para la implementación del algoritmo presentan diversos casos en las que se puede determinar el factor de seguridad por medio del talud infinito teniendo distintas características del suelo y distintos datos de entrada.

Se logró identificar un total de 8 fórmulas distintas que corresponden al método en cuestión a la que cada una identificó las distintas variables de entrada que se requerían para poder ser utilizadas, de forma que se le preguntase al usuario de forma directa lo requerido para poder ejecutarse.

Se logró implementar las 8 fórmulas identificadas en el software MATLAB por medio del uso de la herramienta “*App Designer*”, con la que se pudo realizar el programa de simulación de forma simple.

El programa MATLAB permite la programación de ciertas aplicaciones y algoritmos de manera muy sencilla llegando a crear interfaces gráficas simples para los usuarios y para el programador sin necesidad de llegar a tener amplios conocimientos de programación.

El programa dio como resultado para Loma Linda una categoría de susceptibilidad media a la remoción en masa, lo que se vería reflejado en la presencia de cobertura vegetal tanto en la zona alta del talud como a lo largo de este. Este resultado podría indicar que podría ser pertinente realizar estudios a profundidad sobre la remoción en masa en dicho talud.

El resultado del factor de seguridad para la muestra de Pipiral dio como resultado que es un talud muy inestable, con lo que se hace necesario realizar estudios más profundos e implementar medidas de seguridad y estabilización de taludes para evitar que se generen mayores deslizamientos en la zona.

Es de gran importancia realizar estudios preventivos en distintos tipos de taludes dado a que permite conocer la susceptibilidad de estos a ser afectados por movimientos en masa, permitiendo tomar medidas preventivas que permitan evitar o mitigar posibles eventos futuros.

Recomendaciones

Al momento de desarrollar el proyecto en cuestión se tuvo distintos tipos de dificultades, imprevistos y factores que pudieron ocasionar alguna variación en los resultados, empezando por la cohesión y profundidad del suelo. Inicialmente se buscó determinar la cohesión de ese suelo por medio del uso de una prensa triaxial, el problema radicó que no se logró conseguir dicha herramienta, de forma que la única solución posible fue utilizar bases de datos donde se usó un valor de la cohesión dependiendo del tipo de suelo en el que se encontraba la muestra, además la dificultad de penetrar las rocas impidió medir la profundidad correctamente, con lo que se recomendaría en estudios futuros poder disponer de equipos de campo más robustos para determinar la cohesión de los suelos.

Por otra parte, se registraron abundantes precipitaciones en las zonas de muestreo en los días anteriores por lo que puede que esto afectara los resultados obtenidos de las muestras a pesar que el método de talud infinito no incluya variables de precipitación en sus cálculos.

Otra complicación es que al momento en el que se estaba cavando la calicata llegó a un punto en el que había roca sólida, no pudiendo cavar los 3 metros propuestos inicialmente.

Se recomienda que se realicen diversos estudios posteriores tanto en la zona de estudio de Pipiral como en otras zonas con el objetivo de seguir probando el programa con diversos datos de entrada y generar una mayor calibración de este, tanto para el caso de requerirse estudios más profundos y detallados como para realizar distintos tipos de pruebas al programa.

Se recomienda la implementación de métodos más precisos de determinación de estabilidad en las zonas donde el modelo detecte susceptibilidad a la remoción en masa o se encuentren cercanos

a estos valores con el fin de tomar las medidas pertinentes de prevención y así evitar posibles daños sociales y ambientales.

Se recomienda en estudios posteriores una mayor adaptación del programa, por medio de la realización de una mayor cantidad de pruebas utilizando distintas fórmulas del modelo que permitan una continua calibración del programa o que incluso aumente la cantidad de fórmulas de talud infinito usadas con el fin de abarcar una mayor cantidad de escenarios posibles y con una mayor precisión. Esto también serviría para construir una base de datos de zonas de riesgo a la remoción en masa en la región, que por sus condiciones geográficas, al encontrarse en la Altillanura, es un factor de perturbación ambiental.

Referencias bibliográficas

- Ávila, G. Cubillos, C. Granados, A. Bello, E. Rodríguez, E. Rodríguez, C. Ruiz, G. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, Colombia. Obtenido de: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/GuiaMetodologica-27-07-2016.pdf>
- Báez, D. Cervantes, O. (2012). *MATLAB Con aplicaciones a la ingeniería, Física y Finanzas*. Segunda edición. Alfaomega.
- Betancur, L. (2016). *Derrumbes, un riesgo que cubre a 24 regiones del territorio colombiano*. Consultado el día 20 de Marzo de 2018 de <http://linkis.com/www.eltiempo.com/est/ubXt4>.
- Campos, A. Holm, N. Díaz, C. Rubiano, D. Costa, C. Ramirez, F. Dickson, E. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. Primera edición. Bogotá, Colombia. Obtenido de: <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>
- Chapra, S. Canale, R. (2006). *Métodos numéricos para ingenieros*. Quinta edición. México, D.F. Obtenido de: <http://curso.unach.mx/~rarceo/docs/Chapra.pdf>
- Curipoma, V. (2017). *Análisis comparativo de las metodologías de cálculo de estabilidad de taludes. Tesis de grado*. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. Obtenido de: <http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/2089/1/TRABAJO-DE-GRADOFINAL.pdf>
- Delgado J, Herranz J, Tsige M, Peláez J, Rodríguez M, Giner J. (2018). *Evaluación de la peligrosidad de inestabilidades de laderas asociadas a terremotos*. Consultado el 10 de octubre de 2018. Disponible en <https://web.ua.es/urs/sismosurs/webproyecto/epilates/epimem.html#>

- Domínguez, E. (2010). *Modelación matemática, una introducción al método*. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales. Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de:
<http://www.mathmodelling.org/home/notasdeclase>
- EL tiempo (2017). *¡Atención viajeros! Habilitada vía Bogotá – Villavicencio*. [On line] Consultado el día 2 de Abril de 2018 disponible en: <http://www.eltiempo.com/bogota/viabogota-villavicencio-esta-cerrada-por-caida-de-piedra-102598>
- Escobar C, Duque G. (2016). *Geotecnia para el trópico andino*. Manizales, Colombia. Universidad Nacional de Colombia
- Esqueda J. (2002). *Matlab e Interfaces Gráficas*. Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Tijuana. [Libro en línea]. Consultado el 4 de Junio de 2018, disponible en ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/matlab_seminar/docs/Matlab6xConatec.pdf
- Estabilidad de taludes* (2013). Recuperado el 19 de Marzo de 2018, de <https://estabilidad-detalludes7.webnode.es/news/estabilidad-de-taludes-/>.
- García J. (2014). *Amenaza por remoción en masa en Colombia*. Laboratorio de mapeo. Consultado el 16 de Abril de 2018, disponible en <http://ceelat.org/mapas/amenaza-por-remocion-enmasa-en-colombia/>
- Gerscovich D. (2015) *Tipos de taludes y movimientos en masa. Estabilidad de taludes*. J.L. Garzón. Bogotá, Colombia. Ed. Lemoine Editores. Obtenido de:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/21/analisisdeestabilidaddetaludes.pdf>
- Griffiths D, Huang J, Fenton G. (2011) *Probabilistic infinite slope analysis*. ELSEVIER, 38, 577-584. Obtenido de:
<https://pdfs.semanticscholar.org/baf6/7ac28dc671be21533af042a61b610d34b144.pdf>
- Hammond C, Hall D, Miller S, Swetik P (1992) *“Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0”*. Rocky Mountain Research Station. Consultado el 7 de Mayo de 2018, disponible en
<https://forest.moscowfsl.wsu.edu/cgi-bin/enr/library/searchpub.pl?pub=1992a>
- IDIGER (2016). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Movimientos en Masa en Bogotá*. Consultado el día 9 de Octubre de 2017 de <http://www.idiger.gov.co/rmovmasa>

- INGEOMINAS (2002). *Zonificación integral por amenazas naturales para la ciudad de Villavicencio - Meta*. Bogotá, Colombia. Obtenido de: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B2/11003010002668/documento/pdf/0101026681104000.pdf>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento del Meta*. Bogotá: Igac.
- Instituto Nacional de Vías. (s.f.) *Conservación y transporte de muestras de suelos I.N.V.E.* [En línea], consultado el 5 de Junio de 2018, disponible en <ftp://ftp.ani.gov.co/Bogota%20Villavicencio%20Sector1/4%20HIDRAULICA/Auxiliar/ANX12%20Especificaciones%20Tecnicas%20Invias/normas%20Invias/Normas/Invias/Ensayos/Norma%20INV%20E-103-07.pdf>
- Matteis, A. (2003). *Geología y Geotecnia – Estabilidad de Taludes* [En línea], consultado el 5 de Septiembre de 2018, disponible en <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>
- MINEDUCACIÓN. (2013). *Uso de suelos colombianos no corresponde con su vocación*. Consultado el día 19 de Marzo de 2018 de <https://www.mineduacion.gov.co/cvn/1665/w3-article-326245.html>
- Muscolino R. (2014) *Infinite Slope v3.0 theoretical basis. Infinite slopes proyect*. Consultado el 1 de Mayo de 2018, disponible en <https://www.infiniteslopes.net/the-model.html>
- Organization of American States. (1991) *Primer on Natural Hazard Management in Integrated Regional Development Planning*. Consultado el 3 de Octubre de 2018, disponible en <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea66e/begin.htm#Contents>
- Paris M, Jibson R, (2000). *A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake*. Engineering Geology, Vol 58. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795200000387>
- Paz J, González R, Gómez M, Velazco J, (2017). *Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, Vol 2017. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0188461117300341>

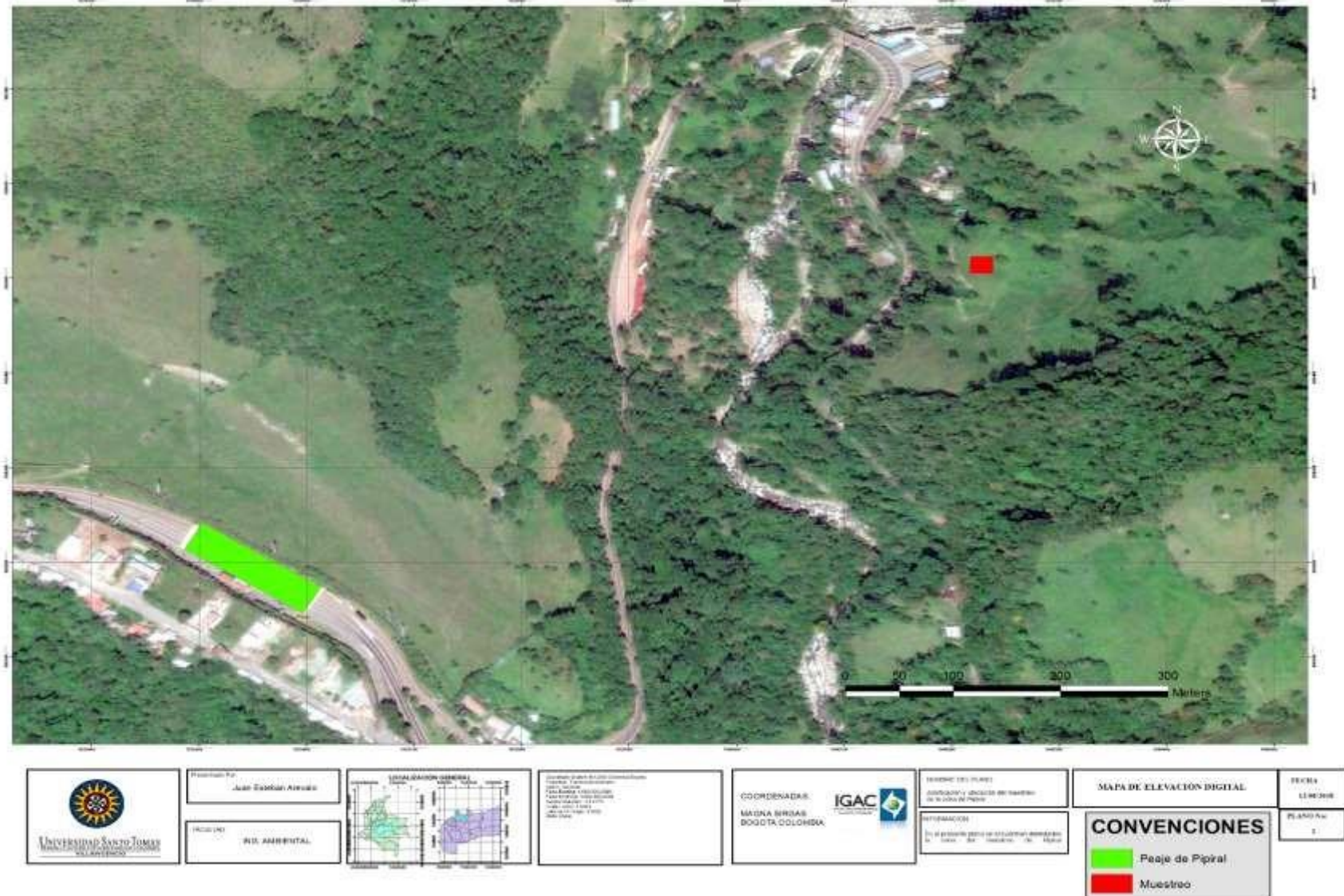
- Jung L, Hyuck P, (2012). *Assessment of Landslide Susceptibility using a Coupled Infinite Slope Model and Hydrologic Model in Jinbu Area, Gangwon-Do*. Economic and Environmental Geology, The Korean Society of Economic and Environmental Geology, Vol 45. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/271230947_Assessment_of_Landslide_Susceptibility_using_a_Coupled_Infinite_Slope_Model_and_Hydrologic_Model_in_Jinbu_Area_Gangwon-Do
- Rodríguez J, Serra J, Oteo C (1982) “*Curso aplicado de cimentaciones*”. [Libro en línea]. Consultado el 7 de Junio de 2018, disponible en <https://civilfree.blogspot.com/2013/12/curso-aplicado-de-cimentaciones-4ta-ed.html>
- Suárez J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia. Ingeniería de Suelos Ltda. Obtenido de: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonastropicales.html>
- Trujillo Vela, M., & Ramos Cañón, A. (2012). *Modelos para simulación de procesos de remoción en masa desagregados. Comparación con el método de talud infinito*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 22(2), 25-37. Obtenido de: <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v22n2/v22n2a02.pdf>

ANEXOS

Anexo 1: Lugar de muestreo de la Sede Loma Linda.



Anexo 2: Lugar de muestreo de Pipiral.



Anexo 3: Código del script

```

disp('Bienvenido, este programa está diseñado para poder determinar el
factor') pause(2.5)
disp('de seguridad utilizando distintas fórmulas de método de talud
infinito') pause(2.5)
disp('en base a la presencia o ausencia de distintas variables') pause(2.5)
disp('primero ingrese la cantidad de FS que calculará en esta sesión')
pause(2.5)
disp('para ser posteriormente graficados una vez calculados (máximo 10) ')
contador= input(' '); fs1=0; fs2=0; fs3=0; fs4=0; fs5=0; fs6=0; fs7=0;
fs8=0; fs9=0; numfs=0; while contador>numfs
disp('Digite un numero para seleccionar las fórmulas a ejecutar:')
pause(1)
    disp('1: Para un suelo con o sin cohesión ')
    disp('2: Con presencia de coeficientes sísmicos pseudoestáticos ')
disp('3: Según esfuerzos efectivos o esfuerzos totales ') disp('4:
Teniendo en cuenta sobrecargas de árboles o por la ecuación general ')
menu= input(' '); switch menu case 1
    disp('A continuación se proseguirá a calcular el factor de seguridad
teniendo') pause(2) disp('en cuenta si el suelo está seco y sin
cohesión o saturado y con cohesión') pause(2) disp('para
seleccionar el caso requerido digite el número correspondiente:')
pause(1)
    disp('1: Para un suelo seco y sin cohesión ')
disp('2: Saturado y con cohesión') menu= input('
'); switch menu case 1
    af= input ('ingrese el ángulo de fricción interna o ángulo de reposo
en grados ');
    angulofric = tan(af);
    ai= input ('ingrese el ángulo de la pendiente en grados ');
    anguloinc = tan(ai);
numfs = numfs+1;
fs=(angulofric/anguloinc);
if numfs==1
fs0=fs;
end if numfs==2
fs1=fs; end if
numfs==3
fs2=fs; end if
numfs==4
fs3=fs; end if
numfs==5
fs4=fs; end if
numfs==6
fs5=fs; end if
numfs==7
fs6=fs; end if
numfs==8
fs7=fs; end if
numfs==9
fs8=fs; end if
numfs==10 fs9=fs;
end case 2
    af= input ('ingrese el ángulo de fricción interna o ángulo de reposo
en grados ');
    angulofric = tan(af); ai= input ('ingrese el
ángulo de la pendiente en grados '); cosai = cos(ai);
senai = sin(ai);

```

```

        cohe= input ('ingrese el valor de la cohesión en t/m2 ');
zprof= input ('ingrese la profundidad del talud en metros ');          ysat=
input ('ingrese el peso unitario del suelo saturado en t/m3 ');
presu= input ('ingrese la presión de los poros en t/m2 ');          numfs =
numfs+1;          fs=
((cohe+(zprof*ysat*((cosai*cosai)presu))*angulofric)/(zprof*ysat*senai*cosai)
); if numfs==1          fs0=fs; end if numfs==2          fs1=fs; end
if numfs==3          fs2=fs; end
if numfs==4
fs3=fs; end if
numfs==5
fs4=fs; end if
numfs==6
fs5=fs; end if
numfs==7
fs6=fs; end if
numfs==8
fs7=fs; end if
numfs==9
fs8=fs; end if
numfs==10 fs9=fs;
end otherwise
        disp('Ingrese un numero valido y reinicie la aplicación')
end case 2
        disp('A continuación se proseguirá a calcular el factor de seguridad
teniendo')          pause(2)
        disp('en cuenta la presencia de coeficientes sísmicos pseudoestáticos')
pause(1)

        af= input ('ingrese el ángulo de fricción interna o ángulo de reposo
en grados ');
        angulofric = tan(af);          ai= input ('ingrese el ángulo de
la pendiente en grados ');          cosai = cos(ai);          senai =
sin(ai);          cohe= input ('ingrese el valor de la cohesión en t/m2
');          zprof= input ('ingrese la profundidad del talud en metros
');          zw= input ('ingrese la profundidad a partir del nivel
freático en metros ');
        ysat= input ('ingrese el peso unitario del suelo saturado en t/m3 ');
        yinsat= input ('ingrese el peso unitario del suelo insaturado en t/m3
');
        yprima= input ('ingrese el peso unitario efectivo bajo el nivel
freático en t/m3 ');
        peso= input ('ingrese el peso total del talud en toneladas ');
vertcoef= ('ingrese el coeficiente sísmico vertical pseudo estático
');          horicoef= ('ingrese el coeficiente sísmico horizontal pseudo
estático
');
        estab= ('ingrese el valor de fuerzas de estabilidad ');
numfs = numfs+1;          fs=
(((cohe/cosai)+(angulofric*((cosai*((yinsat*zw)+(yprima*(zprofzw)))-
(horicoef*peso*senai)(vertcoef*peso*cosai)))))/((senai*((yinsat*zw)+(yprima*
(zprofzw)))+(ysat*(zprofzw)*senai)+(vertcoef*peso*senai*cosai)+(horicoef*p
eso*cosai)-estab)); if numfs==1          fs0=fs; end if numfs==2
fs1=fs; end if numfs==3          fs2=fs; end if numfs==4
fs3=fs; end if numfs==5          fs4=fs; end if numfs==6
fs5=fs; end if numfs==7          fs6=fs; end if numfs==8
fs7=fs; end if numfs==9          fs8=fs; end if numfs==10 fs9=fs; end
case 3

```

```

disp('A continuación se proseguirá a calcular el factor de seguridad
teniendo') pause(2) disp('en cuenta los esfuerzos efectivos y
totales') pause(2) disp('para seleccionar el caso requerido
digite el número correspondiente: ') pause(1)
disp('1:Esfuerzos efectivos ')
disp('2:Esfuerzos totales ')
menu= input(' '); switch menu
case 1
    S= input ('ingrese 1 si la cohesión es cero o 2 si además el flujo es
paralelo a la superficie del terreno '); if S==1;
        presu= input ('ingrese la presión de los poros en t/m2 ');
        ypeso= input ('ingrese el peso unitario del suelo en t/m3 ');
        zprof= input ('ingrese la profundidad del talud en metros ');
        af= input ('ingrese el ángulo de fricción interna o ángulo de reposo en
grados '); angulofric = tan(af);
        ai= input ('ingrese el ángulo de la pendiente en grados ');
        cosai = cos(ai); tanai = tan(ai); numfs = numfs+1;
        fs= ((1-(presu/(ypeso*zprof*(cosai*cosai))))*(angulofric/tanai)); if
numfs==1 fs0=fs; end if numfs==2 fs1=fs; end if numfs==3
        fs2=fs; end if numfs==4 fs3=fs; end if numfs==5
        fs4=fs; end if numfs==6 fs5=fs; end if numfs==7
        fs6=fs; end if numfs==8 fs7=fs; end if numfs==9
        fs8=fs; end if numfs==10 fs9=fs; end elseif S==2
        zprof= input ('ingrese la profundidad del talud en metros ');
        zw= input ('ingrese la profundidad a partir del nivel freático en
metros '); ysat= input ('ingrese el peso unitario del suelo
saturado en t/m3
');
        yinsat= input ('ingrese el peso unitario del suelo insaturado en
t/m3 ');
        af= input ('ingrese el ángulo de fricción interna o ángulo de
reposo en grados '); angulofric = tan(af); ai=
input ('ingrese el ángulo de la pendiente en grados ');
        tanai = tan(ai); mprof= (zw/zprof); numfs = numfs+1;
        fs= ((1-(mprof*(ysat/yinsat)))*(angulofric/tanai));
        if numfs==1 fs0=fs; end if numfs==2
        fs1=fs;
        end if numfs==3 fs2=fs; end if numfs==4
        fs3=fs; end if numfs==5 fs4=fs; end if numfs==6
        fs5=fs; end if numfs==7 fs6=fs; end if numfs==8 fs7=fs;
        end if numfs==9 fs8=fs; end if numfs==10
        fs9=fs; end end case 2 cu= input ('ingrese el esfuerzo de
resistencia al corte en t/m2 '); ai= input ('ingrese el
ángulo de la pendiente en grados '); cosai = cos(ai);
        senai = sin(ai); zprof= input ('ingrese la profundidad del
talud en metros '); ypeso= input ('ingrese el peso unitario
del suelo en t/m3 '); numfs = numfs+1; fs=
        (cu/(ypeso*zprof*cosai*senai)); if numfs==1 fs0=fs; end
        if numfs==2 fs1=fs; end if numfs==3 fs2=fs;
        end if numfs==4 fs3=fs; end if numfs==5
        fs4=fs; end if numfs==6 fs5=fs; end if numfs==7
        fs6=fs;
        end if numfs==8
        fs7=fs; end if
        numfs==9
        fs8=fs; end if
        numfs==10 fs9=fs;
        end otherwise
            disp('Ingrese un numero valido y reinicie la aplicación ')
        end case 4

```

```

disp('A continuación se proseguirá a calcular el factor de seguridad
teniendo') pause(2)
disp('en cuenta otros tipos de operaciones')
pause(2)
disp('para seleccionar el caso requerido digite el número
correspondiente:') pause(1) disp('1:Sobrecargas de
árboles ') disp('2:Ecuación general ') menu= input(' ');
switch menu case 1
    cohe= input ('ingrese el valor de la cohesión en t/m2 ');
    zprof= input ('ingrese la profundidad del talud en metros ');          ysat=
input ('ingrese el peso unitario del suelo saturado en t/m3 ');
    yinsat= input ('ingrese el peso unitario del suelo insaturado en t/m3
');
    ai= input ('ingrese el ángulo de la pendiente en grados ');
    cosai = cos(ai);          senai = sin(ai);          af= input ('ingrese el
ángulo de fricción interna o ángulo de reposo en grados ');
    angulofric = tan(af);          zw= input ('ingrese la profundidad
a partir del nivel freático en metros ');
    Cresis= ('ingrese el valor de la resistencia de las raíces de los
árboles ');
    qsobre= ('ingrese el valor de la sobrecarga generada por el árbol ');
    numfs = numfs+1;
    fs= ((Cresis+cohe+((cosai*cosai)*(qsobre+yinsat*(zprof-
zw)+(ysatyinsat)*zw)*angulofric))/(senai*cosai*(qsobre+yinsat*(zprof-
zw)+ysat*zw))); if numfs==1          fs0=fs; end if numfs==2
    fs1=fs; end if numfs==3
        fs2=fs;
    end if numfs==4
    fs3=fs; end if
    numfs==5
    fs4=fs; end if
    numfs==6
    fs5=fs; end if
    numfs==7
    fs6=fs; end if
    numfs==8
    fs7=fs; end if
    numfs==9 fs8=fs;
    end if numfs==10
    fs9=fs; end case
2
af= input ('ingrese el ángulo de fricción interna o ángulo de reposo en
grados ');
    angulofric = tan(af);          ai= input ('ingrese el ángulo de
la pendiente en grados ');          cosai = cos(ai);          senai =
sin(ai);          cohe= input ('ingrese el valor de la cohesión en t/m2
');          zprof= input ('ingrese la profundidad del talud en metros
');          zw= input ('ingrese la profundidad a partir del nivel
freático en metros ');
    ysat= input ('ingrese el peso unitario del suelo saturado en t/m3 ');
    yinsat= input ('ingrese el peso unitario del suelo insaturado en t/m3
');
    yprima= input ('ingrese el peso unitario efectivo bajo el nivel
freático en t/m3 ');          yagua= 0.998;          mcons= zw/zprof;
    numfs = numfs+1;
    fs= ((cohe+((1-
mcons)*yinsat+(mcons*yagua))*zprof*(cosa
i*cosai)*angulofric)/(((1mcons)*yinsat+(mcons*ysat))
*zprof*senai*cosai)); if numfs==1

```

```

fs0=fs; end if numfs==2          fs1=fs; end if
numfs==3          fs2=fs; end if numfs==4
fs3=fs;
end if numfs==5
fs4=fs; end if
numfs==6
fs5=fs; end if
numfs==7
fs6=fs; end if
numfs==8
fs7=fs; end if
numfs==9
fs8=fs; end if
numfs==10 fs9=fs;
end otherwise
    disp('Ingrese un numero valido y reinicie la aplicación')
end otherwise
    disp('ingrese un numero valido y reinicie la aplicación')
end end disp('el/los factor(es) de seguridad es(son): ')
disp(fs0) grafica=fs0; if fs1~= 0; grafica=[fs0;fs1];
disp(fs1) end if fs2~=0; grafica=[fs0;fs1;fs2]; disp(fs2)
end if fs3~=0;
grafica=[fs0;fs1;fs2;fs3];
disp(fs3) end if fs4~=0;
grafica=[fs0;fs1;fs2;fs3;fs4];
disp(fs4) end if fs5~=0;
grafica=[fs0;fs1;fs2;fs3;fs4;fs5];
disp(fs5) end if fs6~=0;
grafica=[fs0;fs1;fs2;fs3;fs4;fs5;fs6];
disp(fs6) end
if fs7~=0;
grafica=[fs0;fs1;fs2;fs3;fs4;fs5;fs6;fs7];
disp(fs7) end if fs8~=0;
grafica=[fs0;fs1;fs2;fs3;fs4;fs5;fs6;fs7;fs8];
disp(fs8) end if fs9~=0;
grafica=[fs0;fs1;fs2;fs3;fs4;fs5;fs6;fs7;fs8;fs9];
disp(fs9) end plot(grafica)
grid on

```