



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis tridimensional de equilibrio límite por movimientos en masa para la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda en la vereda Monte Loro en Ciudad Bolívar (Antioquia) mediante el programa Scoops 3D

Juan Felipe Luján Rivas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de ingeniería Civil)
Medellín, Colombia
2017

Análisis tridimensional de equilibrio límite por movimientos en masa para la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda en la vereda Monte Loro en Ciudad Bolívar (Antioquia) mediante el programa Scoops 3D

Juan Felipe Luján Rivas

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Geotecnia

Director(a):

Ph.D. Ludger O. Suarez. Burgoa

Línea de Investigación:

Estabilidad de Laderas

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación BIMs (Blocks in Matrix)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2017

(Dedicatoria o un lema)

Su uso es opcional y cada autor podrá determinar la distribución del texto en la página, se sugiere esta presentación. En ella el autor dedica su trabajo en forma especial a personas y/o entidades.

Por ejemplo:

A mis padres

o

La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein

Agradecimientos

Esta sección es opcional, en ella el autor agradece a las personas o instituciones que colaboraron en la realización de la tesis o trabajo de investigación. Si se incluye esta sección, deben aparecer los nombres completos, los cargos y su aporte al documento.

Resumen

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
1 Introducción	2
2 Fundamentos de estabilidad de laderas.	5
3 Scoops3D.	6
3.1 Funcionamiento de los métodos de estabilidad de laderas en Scoops3D	8
3.2 Modelo de elevación digital.	10
3.3 interfaz de usuario.	12
3.4 Archivos de salida.	17
4 Zona de estudio.	20
4.1 Condiciones atmosféricas.	22
4.2 Geología	22
4.3 Geomorfología.	24
5 Scoops3D.	26
5.1 Prueba piloto	26
5.1.1 DEM usado en pruebas preliminares	28
5.1.2 Pruebas Ejecutadas.	30
5.1.3 Parámetros de resistencia.	32
5.1.4 Pruebas Preliminares.	34

5.1.5 Interpretacion	39
6 Recorrido de Campo	40
6.1 Conclusiones	41
6.2 Recomendaciones	41

1 Introducción

Tradicionalmente, desde sus comienzos en la década de los años 30, la estabilidad de laderas se ha concebido como un método para estimar la probabilidad de que un talud, escarpe o ladera presente inestabilidad o pueda ceder ante la incapacidad de los materiales que la componen para sostener su peso en estado parcial o totalmente saturado.

En el año 1937 Fellenius propone el método de dobelas para simular la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos tipo rotacional en macizos de suelo. Para ello se selecciona un lugar que se considera representativo del macizo, en el cual se intersecta un plano imaginario ortogonal a la dirección de plunge de la ladera, para obtener un perfil de elevación bajo el cual se modelan los estratos que componen el macizo de suelo y roca.

Aplicada correctamente, este planteamiento ha probado ser acertado al extrapolar los análisis de la zona seleccionada al macizo en caso de estudio. Para distintas formulaciones matemáticas han sido propuestas a lo largo del siglo XX con el objetivo de simular de manera precisa la interacción de fuerzas que se produce entre dobelas.

Gracias a la capacidad de computo a la que se tiene acceso hoy en día, es posible evaluar tridimensionalmente una superficie con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) la cual es representada por medio de un Modelo de elevación Digital (*Digital Elevation Model*, DEM por sus siglas en inglés) el cual es un archivo raster, es decir, que se compone por celdas (píxeles) cada una de las cuales posee un valor de elevación sobre un nivel de

referencia.

De esta forma el método de dobelas pasa a ser un análisis de columnas el cual no se limita a una sección infinitesimalmente estrecha, sino que es posible analizar la totalidad de la zona de interés.

Como objetivo de este estudio se plantea Realizar un análisis tridimensional de equilibrio límite por movimientos en masa para la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda en la Vereda Monte Loro en Ciudad Bolívar (Antioquia) mediante el programa Scoops 3D. Su importancia se deriva de que la zona de estudio se encuentra altamente poblada (memoria geologica) con abundancia de cultivos agrícolas que ha presentado ocurrencia documentada de movimientos en masa tipo rotacional.

Para llevar a cabo dicho estudio se plantean como objetivos específicos

- Proponer una metodología para la obtención de DEM, y parámetros de resistencia a usar en el software Scoops 3D.
- Producir un mapa de la zona de estudio sobre el cual puedan verse los factores de seguridad y su distribución en La Vereda Monteloro.
- Realizar control de calidad a información SIG y distribución de factores de seguridad obtenidos.
- Interpretar la distribución del factor de seguridad obtenida y su correlación con los factores que controlan su variabilidad.

Inicialmente se han realizado pruebas piloto para comprobar el correcto funcionamiento del software con los datos fuente obtenidos. El resultado del uso del software Scoops3D es una imagen raster monocromática en la cual el valor de cada píxel corresponde al factor de seguridad calculado por el método de Bishop para la totalidad de la zona trabajada. Finalmente, se podrá determinar la correlación que existe entre los factores de seguridad

obtenidos y las variables tenidos en cuenta, como lo son: pendiente, cohesión de los materiales, resistencia al corte directo y humedad.

2 Fundamentos de estabilidad de laderas.

3 Scoops3D.

Scoops3D es una herramienta software disponible para plataformas Microsoft Windows y Mac desarrollado por el servicio geológico de Estados Unidos EEUU cuya finalidad es llevar a cabo análisis de estabilidad en las laderas de un modelo de elevación digital (DEM) introducido.

Transformando cada pixel del DEM introducido en una columna, scoops3D analiza automáticamente millones de superficies de falla potenciales mediante análisis de equilibrio limite. Como resultado se obtiene un archivo de imagen (raster) con los factores de seguridad (indicadores de estabilidad) para la zona estudiada.

La capacidad de trabajar sobre zonas que se extienden por miles de kilómetros cuadrados a la vez que se tienen en cuenta distintas características geológicas, geotécnicas y condiciones variables de saturación parcial en profundidad. Le da a Scoops3D una gran ventaja sobre herramientas computacionales bidimensionales, ya que su utilidad a laderas seleccionadas individualmente. Scoops3D se fundamenta en los métodos de dobelas de Bishop y Fellenius, lo que implica que solamente es aplicable al análisis de superficies de falla de tipo rotacional.

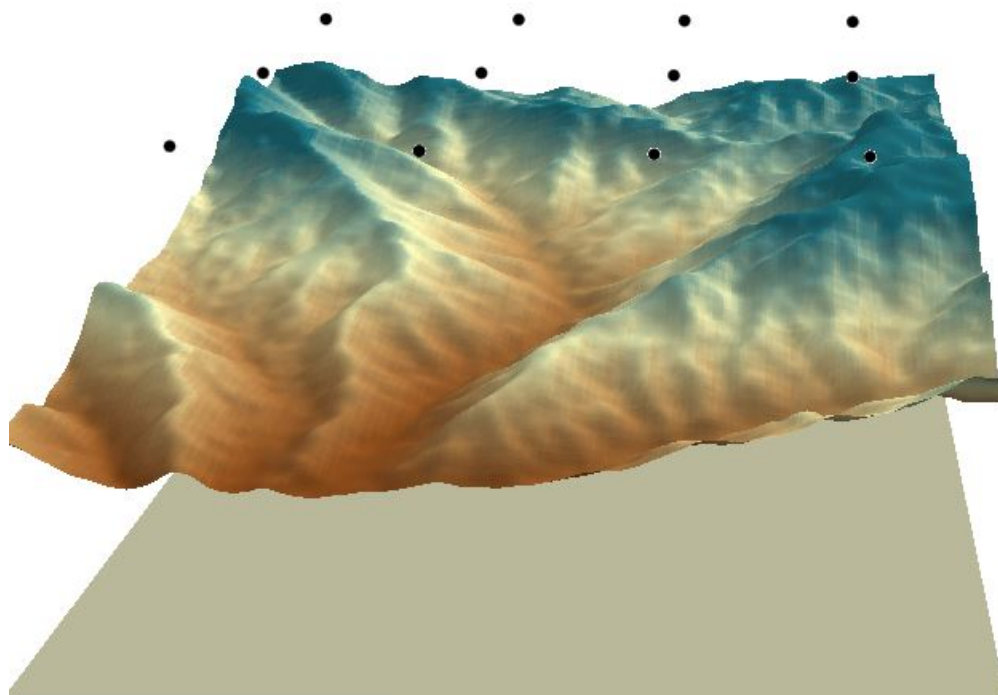


Figura 3.1: Rejilla de centros de esfera de falla sobre la superficie digital que representa la zona de trabajo. Elaboración propia.

Es importante resaltar que, además de no estar contemplado entre los alcances ni objetivos de este proyecto, Scoops3D no posee la capacidad de simular el comportamiento de un eventual flujo de lodo o escombros desencadenado por un evento de deslizamiento o falla.

3.1. Funcionamiento de los métodos de estabilidad de laderas en Scoops3D

Como se ha mencionado anteriormente, Scoops3D se basa en la aplicación de los análisis de equilibrio límite por medio de los métodos de dedobelas, que aplicado en un entorno tridimensional puede verse como una análisis por medio de columnas. Cada columna posee entonces lados de distancia equivalente, la cual está dada por el tamaño de pixel que posee el DEM especificado, mientras que la altura de la columna estará dada por la distancia entre la superficie del DEM y la superficie de falla.

La superficie de falla que intersecta las dobelas en profundidad es una esfera con centro en cualquier lugar sobre la superficie del DEM y un radio r . Scoops3D incluye en el análisis de cada superficie de falla todas y cada una de las dobelas cuyo píxel correspondiente posea 2 o mas vértices al interior de la superficie de falla.

En general, los métodos de equilibrio límite definen el Factor de seguridad (F) como la relación entre las fuerzas resistentes s y las fuerzas actuantes τ

$$F = \frac{s}{\tau}$$

Donde F inferior a uno (1) indica inestabilidad. Para áreas definidas, como el área en la base de cada columna (A)

La fuerza actuante (T) sobre A estará dada por

$$T = \left(\frac{1}{A}\right) \int_A \frac{sA}{F} dA$$

Discretizando las componentes i y j correspondientes a las fuerzas resistentes x y y

3.1 Funcionamiento de los métodos de estabilidad de laderas en Scoops3D

respectivamente, se tiene.

$$T = \frac{1}{F} \sum s_{i,j} A_{i,j}$$

i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
1,2	2,2	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j
1,1	2,1	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j	i,j

La columna $i = 1$ y $j = 1$ será aquella ubicada en la posición del píxel en la esquina inferior izquierda del DEM.

El equilibrio de momentos se calcula a lo largo de un eje rotacional basado en el centro de la esfera de falla, dicho eje es horizontal y normal a la dirección potencial de falla. El momento actuante está direccionado principalmente por la fuerza de la gravedad (W)

$$a_{i,j} = R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$$

Donde $R_{i,j}$ es la distancia desde el centro de la esfera hasta el centro del área A en la base de la columna, $\alpha_{i,j}$ es el buzamiento aparente del plano de área (A) visto desde la posición del centro de la esfera. En $R_{i,j}$ se puede apreciar una de las principales diferencias entre el análisis de equilibrio limite en 2D y 3D, ya que en 3D dicha distancia siempre es variable, por lo cual el momento actuante (M_{act}) de cada columna debe calcularse independientemente, para lo cual se usa la expresión:

$$M_{act} = \sum R_{i,j} W_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$$

El momento resistente(M_r) está representado por la sumatoria de los productos de esfuerzos cortantes en la parte inferior de cada columna.

$$M_{Total} = \sum R_{i,j} \frac{s_{i,j} A_{i,j}}{F}$$

por lo que al reemplazar $s_{i,j}$

$$M_{Total} = \sum R_{i,j} \frac{C_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - U_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}}{F}$$

Donde $N_{i,j}$ es la fuerza normal correspondiente a cada columna.

El momento de equilibrio para una columna individual estar? dada entonces por la expresion.

$$\sum M = \sum R_{i,j} \frac{c_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}}{F} - \sum W_{i,j} R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$$

Por lo que el factor de seguridad F Está dado por:

$$F_{i,j} = \frac{\sum R_{i,j} (c_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j})}{\sum W_{i,j} (R_{i,j} \sin \alpha_{i,j})}$$

3.2. Modelo de elevación digital.

Un modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) es un archivo digital que representa una superficie en el espacio tridimensional, pueden realizarse modelos de elevación digital de espacios existentes en la superficie terrestre, planetas otros cuerpos estelares. El

modelo de elevación digital posee como principal característica que contiene información referente a la elevación de cada punto X,Y. Términos sinónimos a “modelo de elevación digital” son Modelo digital de terreno (DTM por sus siglas en inglés) y Modelo Digital de Superficie (DSM por sus siglas en inglés). La información contenida en un DEM puede representarse en forma Raster (rejilla de píxeles), de forma vectorial como un TIN (Triangular Irregular Network por sus siglas en inglés) o simplemente por puntos de coordenadas XYZ a partir de los cuales se puede generar un DEM tipo RASTER o TIN.

Comúnmente, la información DEM es obtenida por técnicas como fotogrametría, lidar, IfSAR, recorridos de campo, etc. Gracias a la capacidad de cómputo que poseen las herramientas SIG actuales, los DEM generados por los sensores remotos actuales cuentan con alta resolución y abarcan importantes extensiones de la superficie terrestre.

ESRI ASCII. El modelo de superficie trabajado en este proyecto es un DEM RASTER en el formato ESRI ASCII (extensión .asc) este archivo cuenta con el siguiente encabezado al abrirse desde un editor de texto.

```

NCOLS xxx
NROWS xxx
XLLCENTER xxx | XLLCORNER xxx
YLLCENTER xxx | YLLCORNER xxx
CELLSIZE xxx
NODATA.VALUE xxx
row 1
row 2
...
row n

```

Lo cual corresponde a número de celdas, número de columnas, tamaño de celda (metros sobre la superficie terrestre que representa cada píxel, debe ser mayor a cero), coordenadas x,y del origen y valor que representa la ausencia de información. ASTER GDEM V2 La segunda versión de ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) fue realizada por la NASA (United States National

Aeronautics and Space Administration) y publicada el 17 de Octubre de 2011. Esta adquisición consta de topografía digital a escala global y comprende hasta un 99% de la superficie terrestre, siendo esta la adquisición de datos topográficos con mayor extensión hecha pública hasta la fecha. La resolución máxima de pixel en esta adquisición es de hasta 30m por pixel DEM Usado. El modelo de elevación digital empleado en este trabajo corresponde a una muestra tomada de ASTER GDEM V2 comprendida entre la coordenadas 650354.816N 8469349.749 W 641724.797 S 8457102.358 E (metros mercator). La resolución de pixel obtenida para esta zona es de 38m según consta en el encabezado del DEM Arc ASCII. El sistema de coordenadas asignado al DEM es *MAGNA_SIRGAS_Colombia_West_zone*.

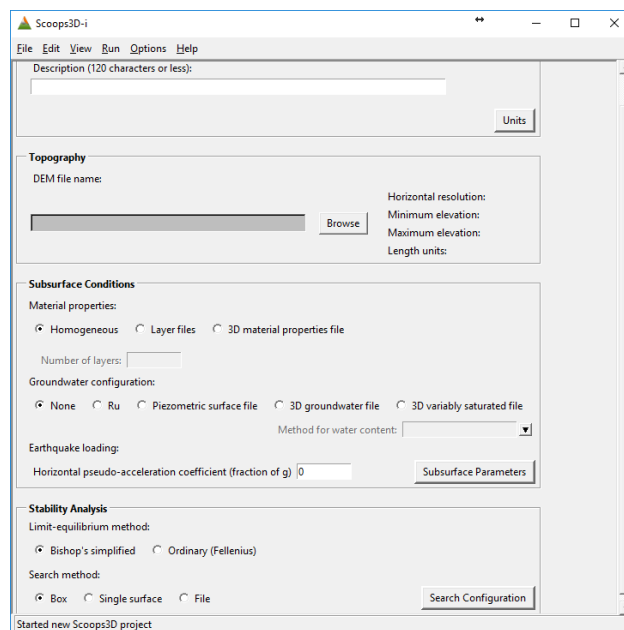
```
ncols 168
nrows 100
xllcorner 1109663.905
yllcorner 1137344.545
cellsize 38.218514142587
nodata_value -9999.0
```

El DEM usado en este proyecto se muestra en la imagen 5.1

3.3. interfaz de usuario.

La interfaz de usuario principal de Scoops3D cuenta con 4 secciones principales tituladas Description, Topography, Subsurface Conditions y Stability Analysis. En la sección Description se cuenta con un recuadro de texto en el cual el usuario puede introducir una descripción del proyecto a realizar, adicionalmente, se cuenta con un botón titulado Units (unidades) cuyo funcionamiento se describe a continuación.

En la ventana de selección de unidades el usuario puede seleccionar las unidades de

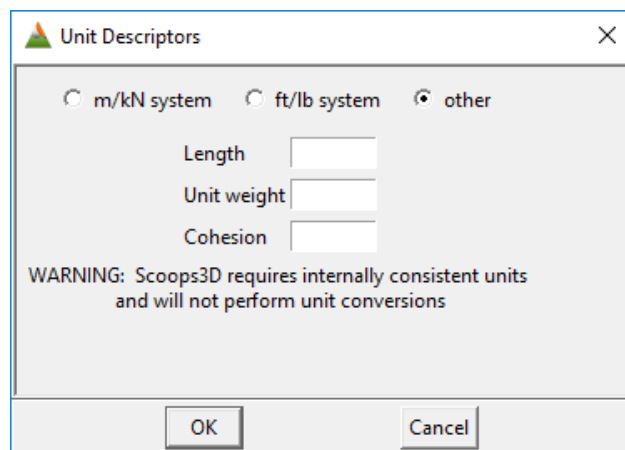
Figura 3.2: Ventana principal de Scoops3D**Figura 3.3:** Ventana principal de Scoops3D en el sistema operativo Windows. elaboración propia.

esfuerzo a trabajar, o trabajar en sus propias unidades personalizadas. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que Scoops3D no realiza conversión alguna al momento de su ejecución. Por lo cual se debe tener claridad sobre las unidades longitudinales que posee el DEM así como las unidades de área ingresadas en la ventana de búsqueda de superficie de falla. Su estructura se ilustra en la figura ??

Condiciones superficiales.

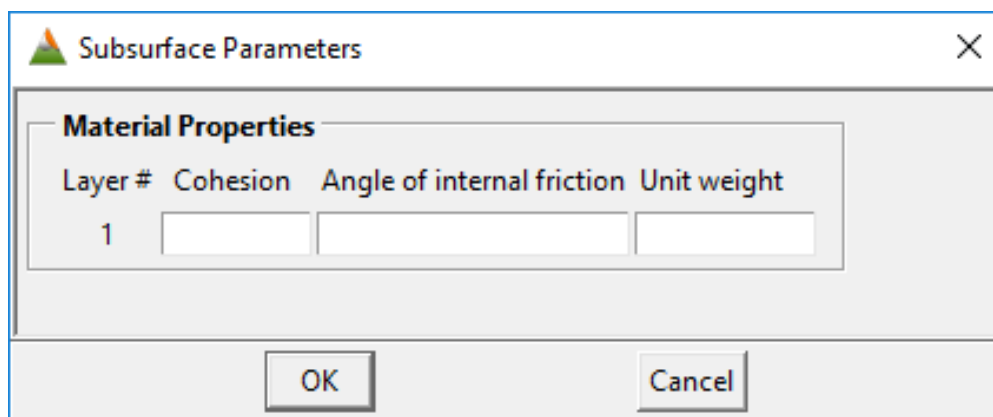
Scoops3D posee la capacidad de integrar distintas unidades estratigráficas en la simulación de superficie de falla. La representación geométrica de dichas unidades se pueden ingresar a Scoops3D por medio de DEM que representen el techo de cada unidad. Para usar esta funcionalidad se debe marcar el checkbox layer files en la ventana principal de Scoops3D.

En caso de ser necesario el uso de varias unidades estratigráficas, es necesario ingresar los parámetros de resistencia de cada una de los materiales representados, para lo cual se

Figura 3.4: Selección de unidades

The dialog box titled "Unit Descriptors" contains three radio buttons: "m/kN system", "ft/lb system", and "other". The "other" option is selected. Below the radio buttons are three text input fields labeled "Length", "Unit weight", and "Cohesion". A warning message states: "WARNING: Scoops3D requires internally consistent units and will not perform unit conversions". At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

hace uso de la ventana de parámetros subsuperficiales. ilustrada en la figura 3.6. En esta ventana no es necesario digital las unidades (MPa) o símbolo alguno para representar los grados del parámetro ϕ



The dialog box titled "Subsurface Parameters" contains a section titled "Material Properties". Inside this section is a table with four columns: "Layer #", "Cohesion", "Angle of internal friction", and "Unit weight". The first row of the table has the value "1" in the "Layer #" column and empty input fields for the other three columns. At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Layer #	Cohesion	Angle of internal friction	Unit weight
1			

Figura 3.6: Ventana de introducción de parámetros de resistencia de unidades geológicas subsuperficiales. Elavoración propia.

De la misma manera, la cabeza piezométrica o nivel freático se puede representar por medio de un modelo de elevación digital como se ilustra en la figura 3.7

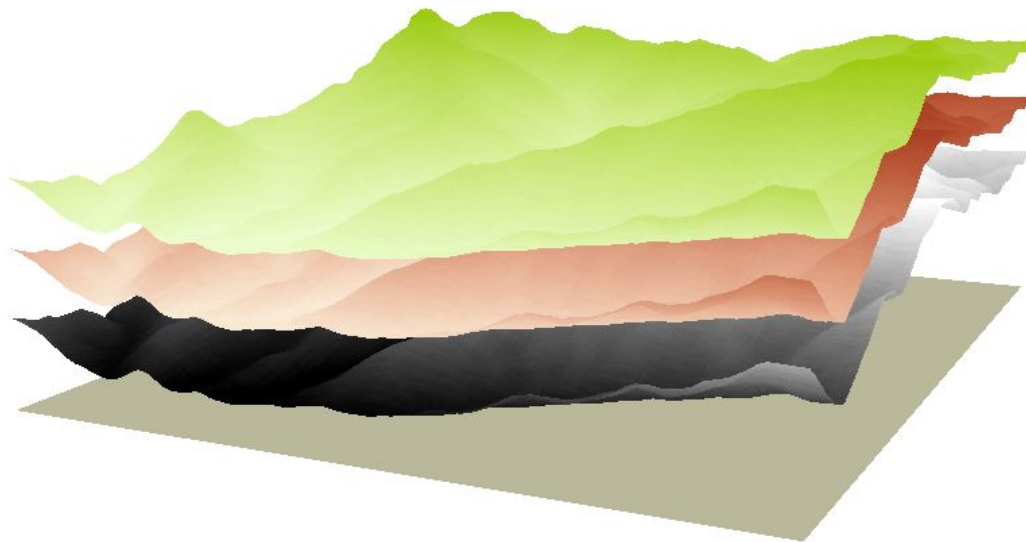


Figura 3.5: Representación de distintas geológicas (verde, rojo, negro). Elaboración propia.

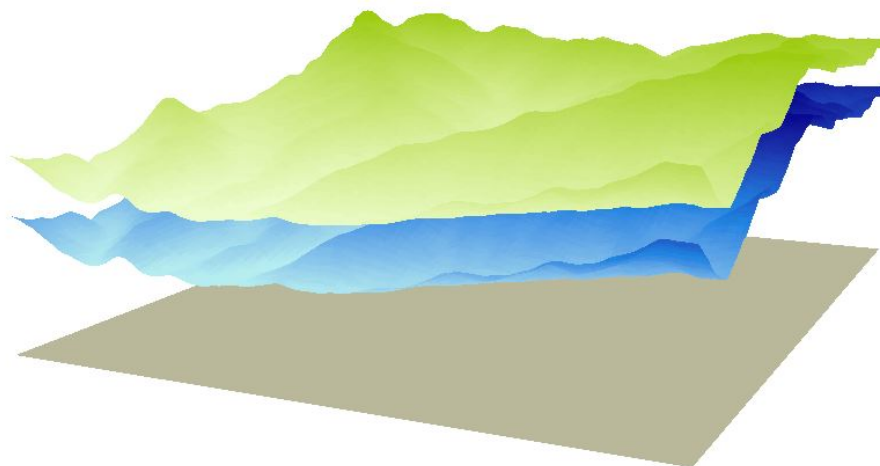


Figura 3.7: Representación de un nivel piezométrico (azul) como una superficie bajo el DEM superficial (verde).

Análisis de estabilidad

En el apartado de análisis de estabilidad de la ventana principal de Scoops3D se puede

seleccionar el método de análisis de estabilidad de laderas que se desea emplear. Las opciones disponibles son Bishop simplificado y Fellenius. Asimismo se puede seleccionar el método de búsqueda de superficie de falla, las opciones disponibles son caja, cuyo funcionamiento se detalla en el uso de la ventana search-box. Superficie específica, el cual evalúa la posibilidad de ocurrencia de superficies de Falla respecto a un único centro de esfera determinado por el usuario. Y por último el método de búsqueda por medio de un archivo de coordenadas XYZ las cuales deberán corresponder a los centros de esfera de falla a evaluar.

Método de Búsqueda por caja

Figura 3.8: Parámetros de búsqueda

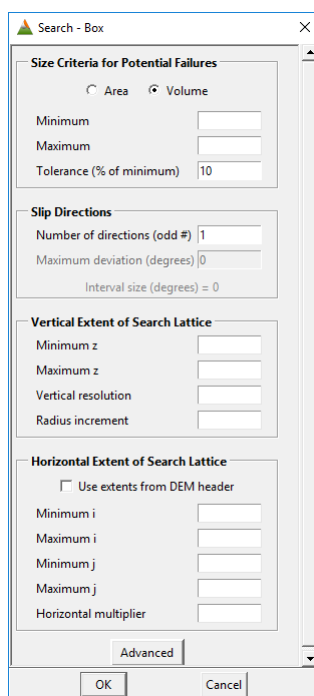


Figura 3.9: Ventana de parámetros de la caja de búsqueda de superficies de falla, la resolución de dicha rejilla de búsqueda impacta directamente en el tiempo que toma la ejecución de Scoops3D, este, al ser un programa basado en la arquitectura bits) no obtiene mayor ventaja con el uso de altas cantidades de memoria RAM ni procesadores con elevado número de núcleos

Inicialmente se definen las dimensiones de la caja de trabajo (figura 3.9) en la cual Scoops3D buscará superficies de Falla. La extensión de dicha caja estarán dadas por la altitud mínima y máxima del DEM a trabajar y el alcance norte-sur y este-oeste del mismo, el usuario es libre de modificar estas características y trabajar con una extensión superior o inferior a las del DEM.

3.4. Archivos de salida.

Scoops3D tiene la capacidad de producir una gran variedad de archivos de salida los cuales le posibilitan al usuario obtener información acerca de la corrida realizada así como obtener un estimativo de la distribución espacial de los factores de seguridad para las zonas contenidas en el DEM base, teniendo en cuenta los parámetros de resistencia introducidos. Cada archivo de salida está compuesto principalmente por el nombre del proyecto ejecutado, seguido por el carácter guión bajo (-) y el nombre respectivo del archivo generado. En la siguiente tabla se listan los archivos estándar de salida junto con su respectiva descripción.

Tabla 3.1: Tabla descriptiva de los archivos generados en una ejecución estándar de Scoops3D.

<code>_out.txt</code>	Este archivo en formato de texto plano contiene los parámetros de resistencia y parámetros de búsqueda introducidos en la interfaz de usuario de Scoops3D, así como información básica de la prueba realizada, método de análisis de estabilidad usado, listado de archivos de salida generados, dimensiones del DEM base y DEMs generados.
<code>_fos3d_out.asc</code>	Este archivo tipo ASCII DEM posee las mismas dimensiones del DEM original, contiene la distribución de factores de seguridad calculados para cada píxel
<code>_fosvol_out.asc</code>	Este archivo tipo DEM contiene la magnitud de masa o metros cúbicos de material desplazado en un área cuyo factor de seguridad sea inferior a 1
<code>_fosarea_out.asc</code>	
<code>_spheres_out.okc</code>	Archivo DEM que expresa la ubicación y altura del centro de esfera de las superficies de falla encontradas y a su vez que tienen factor de seguridad inferior a 1
<code>_slope_out.asc</code>	Este Archivo DEM es un mapa pendientes del modelo de elevación digital original.
<code>_errors_out.txt</code>	Este archivo de texto plano contiene las advertencias encontradas durante la ejecución de Scoops3D. Cabe destacar que la existencia de notas o errores en este archivo no implica una mala ejecución o mala calidad de los archivos de salida del proyecto de Scoops3D

Adicionalmente se cuenta con el archivo Boundcheck. este es un archivo raster en el cual se puede observar si los limites de la rejilla de búsqueda ha sido una limitante para la detección de superficies de falla. Considerando, por ejemplo, una ladera de baja pendiente

Tabla 3.2: My caption

código	problema encontrado
0	ninguno
100	ancho mínimo muy alejado
900	ancho máximo muy cercano
10	alto mínimo muy elevado
90	alto máximo muy bajo
1	elevación mínima muy alta
9	elevación máxima muy baja
-9999	no se encontraron superficies de falla

compuesta por materiales de baja competencia los cuales presentan una superficie de falla ante determinadas condiciones de humedad o longitud de la ladera. En este caso, el centro de la esfera que sigue la trayectoria de dicha superficie de falla rotacional se encontrará ubicado en una altitud considerable respecto a la ladera en cuestión.

a medida que la ladera posee una pendiente menos pronunciada, el centro de la esfera de falla tenderá al infinito.

dado que a partir de determinados parámetros de resistencia la aplicación del método de Bishop comienza a producir factores de seguridad cada vez mas elevados, no es necesario realizar pruebas en búsqueda de centros de esfera que se aproximen a infinito. sin embargo si es posible realizar una búsqueda en la cual la altura máxima de centros de esfera sea una limitante para hallar superficies de falla que posean factor de seguridad considerablemente bajo. Para ello, el archivo boundcheck muestra distintos valores en función del comportamiento del centro de esfera respecto a los límites verticales y laterales de la caja de búsqueda.

En la medida de lo posible, no se debe limitar la detección de superficies de falla a los límites verticales y laterales de la caja de búsqueda empleada

4 Zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra localizada en las afueras del perímetro urbano del municipio de Ciudad Bolívar en el Departamento de Antioquia. Las laderas noroccidental y surenoriental de la quebrada la linda abarcan un área de xx metros cuadrados con pendientes que oscilan entre el 20 % y 30 % La Quebrada La Linda no posee afluente alguno, sus aguas se desembocan en La Quebrada La Raya. Las pendientes más pronunciadas de la cuenca hidrográfica de la Qda. La Linda se encuentran aguas arriba en, hacia las cercanías del Batolito Farallones, tal como se puede apreciar en la figura 4.1

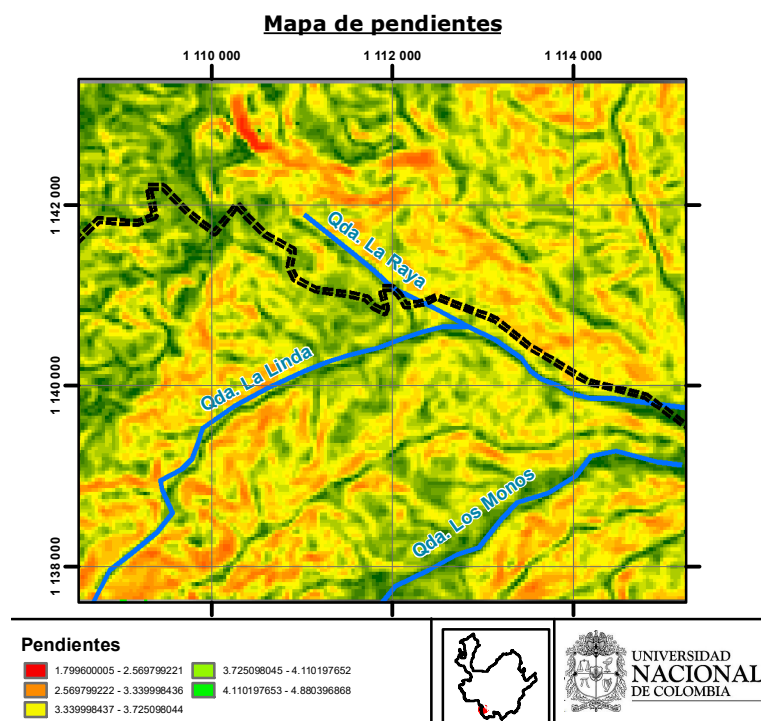


Figura 4.1: Mapa de pendientes de la cuenca hidrográfica de la Qda. La Linda y sus zonas circundantes. Elaboración propia

Para el tratamiento de esta cuenca hidrográfica no se ha realizado separación de UMI (Unidad Morfodinámica independiente) por los siguientes motivos

La principal vía de acceso es la carretera que desde el municipio de Ciudad Bolívar conduce a El Carmen de Bolívar.

4.1. Condiciones atmosféricas.

La precipitación en la zona de estudio está influenciada principalmente por la presencia de la orogenia andina, mas especificamente al flanco occidental de la cordillera occidental. Aunque (memoria de susceptibilidad) afirma que la precipitación anual en la zona comprendida en la plancha 165 - Carmen de Bolivar oscila entre los 3000 y 7000 mm. (anuario Antioquia 2014) afirma que la precipitación promedio se encuentra en los 2465mm con una medición de 2900 para el año 2014. La clasificación del sector corresponde a bosque humedo premontano (memoria geologica)

4.2. Geología

En la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda se encuentran 2 unidades geológicas, una sedimentaria la cual corresponde al Miembro Urrao de la Fm. Penderisco y aguas arriba de la Quebrada La Linda se encuentra el Batolito Farallones.

Batolito Farallones. Ubicado al Sur del Stock de Cerro plateado de formación y de formación contemporanea a este. El Batolito Farallones recibe su nombre por encontrarse localizado al Este de la Localidad de Farallones. El Batolito Farallones de edad Mioceno presenta una aureola de contacto extensa (500m aprox), fuertemente fallada y plegada con los sedimentos cretácicos que lo rodean en su extremo norte. Su altura alcanza aproximadamente los 3400msnm exhibiendo escarpes casi totalmente verticales. Su clasificación se determinó como intrusivo monzonítico, datado por el método K/Ar como originado hace 11 +- 2 m.a. (calle 1980 en memoria geologica)

Fm. Penderisco Miembro Urrao. La sedimentación de la formación penderisco se ubica entre el cretaceo temprano a tardio como producto de flujos de turbiedad. Está

compuesta por estratos de rocas que varían en calibre desde areniscas pasando por limolitas y lodolitas (siendo esta la facie predominante) hasta chert, este último se presenta frecuentemente como interestratificaciones finas. Se presentan igualmente conglomerados de tamaño de clasto altamente variable (polimíctico), los cuales presentan espesores y arreglos altamente variables. Tanto algunas lodolitas como estratos de areniscas exhiben estructuras de polaridad como estratificación cruzada. Debido al emplazamiento de los intrusivos del Mioceno, los sedimentos de la Fm. Penderisco exhiben fuertes buzamientos que fluctúan entre 60 y 70 grados. Su estructura fue fuertemente modificada por el emplazamiento del Batolito Farallones en el Neógeno temprano. En la figura 4.2

La descripción geológica retomada de la información bibliográfica oficial sirvió en los ensayos preliminares del software Scoops3D como referencia para seleccionar los parámetros de resistencia a usar en dichos ensayos.

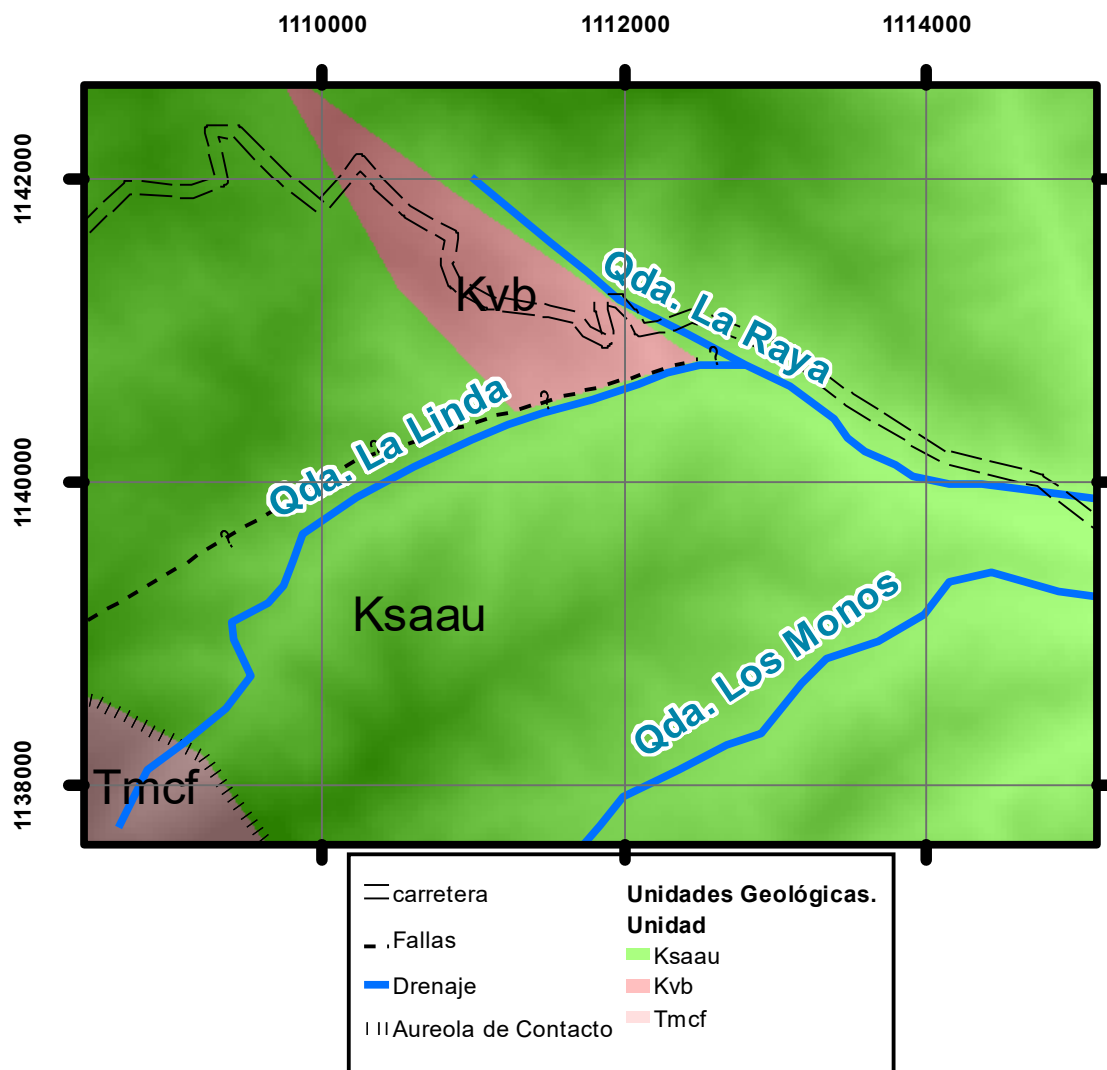


Figura 4.2: Mapa geológico de la zona de estudio(memoria geológica). Acercamiento de elaboración propia.

4.3. Geomorfología.

La geomorfología de la zona de estudio se presenta en la figura 4.3, está caracterizada principalmente por laderas con 23 % de pendiente con desviación estándar del 10 %. Según se describe en (memoria geologica) la zona presenta una fuerte influencia estructural lo cual

se refleja en abundante fallamiento y plegamiento, de ahí que la expresión morfológica de la zona exhiba laderas de pendiente media a larga con pendientes de inclinación abrupta. En la Ladera norte de la Qda. La Linda se presenta un patrón de drenaje subdendrítico, por lo cual se clasifica esta unidad como un Gancho de Inflexión (Sgf), mientras que en la ladera sur el patrón de drenaje es Subparalelo, por lo cual la unidad se caracteriza como un Espolón Moderado de longitud larga (Sesml).

Ambas laderas muestran cicatrices de movimientos en masa tipo rotacional, adicionalmente se presentan movimientos tipo traslacional en el Sesml. **revisar las definiciones de cada unidad**

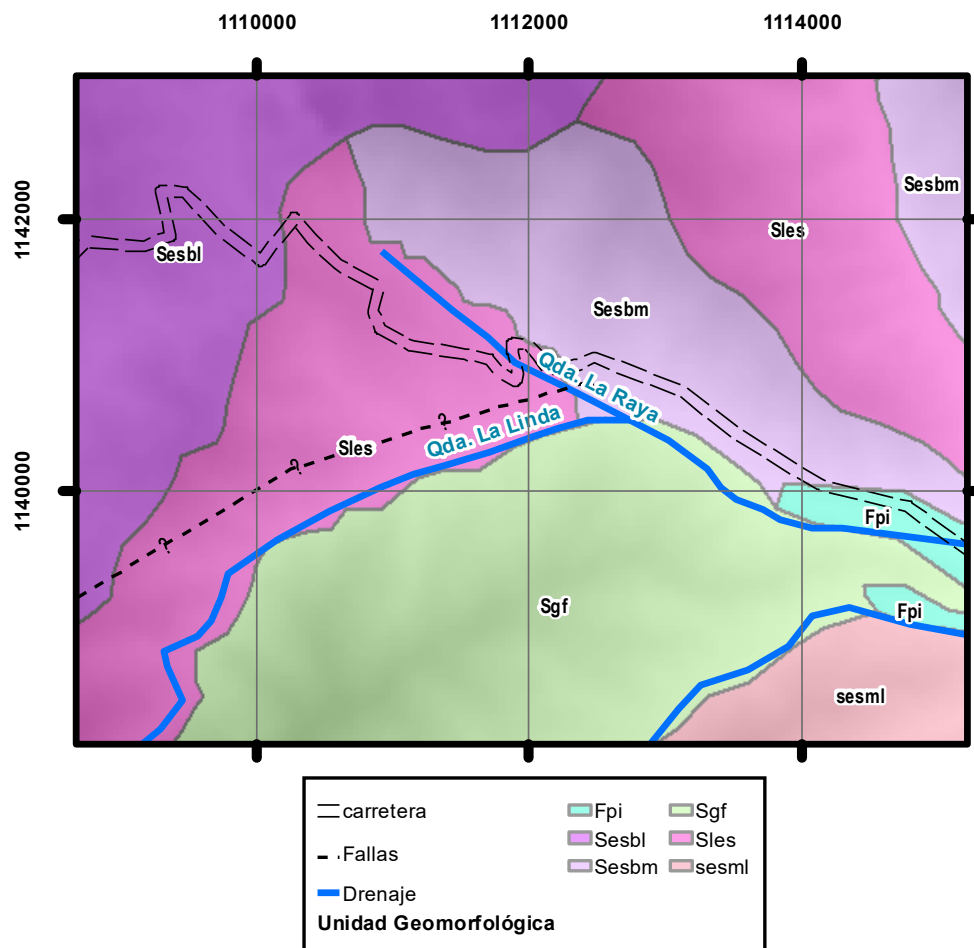


Figura 4.3: Mapa geomorfológico. Basado en (mapa geomorfo). Acercamiento elaboración propia

5 Scoops3D.

Tanto las pruebas preliminares como la corrida final de Scoops3D se realizaron en un equipo de computo usando el sistema operativo Windows 10 Pro con las siguientes características. Modelo MSI Procesador Intel Core i7 6700HQ. 8GB de memoria RAM DDR4, GPU Nvidia GeForce 940mx.

5.1. Prueba piloto

Las pruebas piloto en Scoops3D se realizaron desde la concepción de este proyecto y estuvieron encaminadas a brindar información sobre los siguientes conceptos.

- Preparar la información geográfica a las necesidades de funcionamiento de Scoops3D
- Evaluar la calidad del DEM a usar como insumo base en Scoops3D
- Adquirir familiaridad con la interfaz gráfica de usuario de Scoops3D para lograr una mejor documentación de su forma de uso.
- Conocer el formato de entrada de los parámetros de resistencia en la interfaz de usuario de Scoops3D.
- determinar la extensión espacial y resolución de la rejilla de búsqueda de superficie de falla en Scoops3D.

- Optimizar los parámetros de búsqueda de superficies de falla para reducir tiempo de cómputo.
- Comprender y correlacionar los distintos archivos de salida de información que proporciona Scoops3D.

Durante este proceso ha sido de vital importancia contar con conocimientos en Sistemas de Información Geográfica para preparar adecuadamente los archivos de entrada, así como para interpretar los archivos de salida.

5.1.1. DEM usado en pruebas preliminares

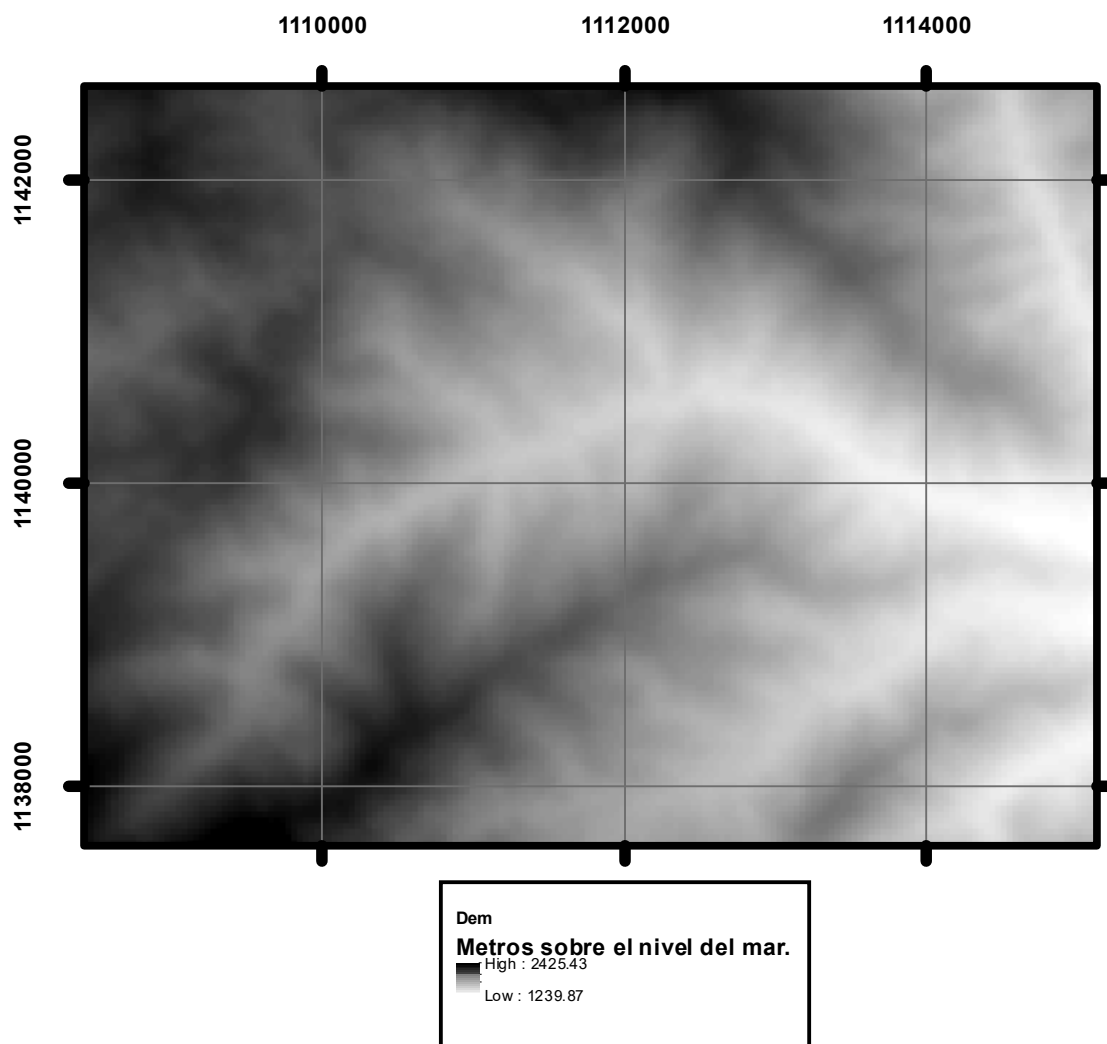


Figura 5.1: Imagen monocromática del DEM trabajado desplegado en escala de grises. Altura mínima 1239 msnm, altura máxima 2425msnm. Elaboración propia.

Para las pruebas iniciales se usó el DEM mencionado en el numeral xxxxx de ASTER GDEM V2 dada su fácil y rápida adquisición por medio del software Global Mapper desarrollado por Blue Marvel. El software Global Mapper tiene la capacidad de exportar el formato ESRI ASCII que utiliza Scoops3D como insumo base, se recomienda exportar el DEM con la mayor resolución posible, en caso de requerir agilizar el tiempo de procesamiento en Scoops3D, se

recomienda disminuir resolución espacial al DEM. Lo cual se puede lograr fácilmente con la herramienta Resample de ArcGIS en sus versiones 10 y superior (Tool Geoprocessing toolboxes (\systemtoolboxes\datamanagementtools.tbx\raster\rasterprocessing\resample) y posteriormente la herramienta **Raster to ASCII** (toolboxes\systemtoolboxes\conversiontools.tbx\fromraster\rastertoascii) en el software Qgis con la herramienta Raster Calculator.

Debido a que Scoops3D no acepta sistemas de coordenadas geográficas sino proyectadas, se trabajó con el sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS Colombia West zone. Se pudo comprobar que el idioma y la configuración regional puede causar que el archivo DEM base pueda no ser compatible con Scoops3D debido al formato de separación de decimales y unidades de miles. A continuación se muestra un archivo DEM incompatible y uno compatible con Scoops 3D.

```
ncols 2
nrows 2
xllcorner 0
yllcorner 0
cellsize 1
NODATA_value -9999
0,5 1,5
2,5 -9999
```

Nótese que la separación de decimales se realiza con el carácter coma (,). Esto como resultado de la configuración por defecto del sistema operativo Windows 10 en regiones como américa latina y España. Al introducir un archivo DEM con el formato anteriormente ejemplificado en Scoops3D, se obtiene el siguiente error.

```
ncols 2
nrows 2
xllcorner 0
yllcorner 0
cellsize 1
NODATA_value -9999
0.5 1.5
2.5 -9999
```

El formato adecuado de DEM para usar con Scoops3D debe ser con separación de decimales con punto (.) Finalmente se decidió trabajar con un DEM de tamaño de pixel 38m×38m, esta es resolución obtenida de ASTER GDEM V2 sin modificación alguna para la zona de trabajo en el municipio de Ciudad Bolívar. Este Ráster se compone de 27.482 píxeles, cubre en total **104.4** hectáreas, comprende alturas entre los 1293 y los 2425 msnm. En la zona de trabajo, con base en la información trabajada, se cuenta con laderas cuyas pendientes alcanzan el 43 %.

Dado que no se está realizando el análisis de una localidad específica sino un área considerable, no se ha considerado necesario trabajar con cartografía de detalle. A manera de ensayo, se realizó una corrida, con la misma extensión del DEM mostrado en la figura 5.1 y la misma configuración ilustrada en la figura 3.6, empleando un DEM de tamaño de pixel de 5x5 metros. Bajo esta configuración la ejecución de Scoops3D se prolongó durante 30 horas sin obtener un resultado final.

5.1.2. Pruebas Ejecutadas.

En la siguiente captura de pantalla se muestran los parámetros de la caja de búsqueda empleados en las pruebas realizadas con Scoops3D.

The screenshot shows a 'Search - Box' dialog box with the following settings:

- Area** (selected): Minimum (m³) = 1600, Maximum (m³) = 40000, Tolerance (% of minimum) = 10.0.
- Slip Directions**: Number of directions (odd #) = 1, Maximum deviation (degrees) = 0, Interval size (degrees) = 0.
- Vertical Extent of Search Lattice**: Minimum z (m) = 950, Maximum z (m) = 17500, Vertical resolution (m) = 100, Radius increment (m) = 38.
- Horizontal Extent of Search Lattice**: ☒ Use extents from DEM header, Minimum i = 1, Maximum i = 323, Minimum j = 1, Maximum j = 228, Horizontal multiplier = 1.

At the bottom, it displays: DEM minimum z = 988.613 m, DEM maximum z = 3573.358 m, DEM horizontal resolut.

Figura 5.2: Parámetros usados en la ejecución de pruebas preliminares.

Se trabajó con el rango de búsqueda de movimientos en masa por rango de volumen, basado en los movimientos registrados en la base de datos SIMA para la zona de trabajo. Para cada nodo de búsqueda se analiza solamente una dirección de deslizamiento. En la extensión vertical de las dovelas de falla se toma una altura ligeramente inferior a la altura menor existente en el DEM y como altura máxima se tomó una altura de 17500 msnm, esta última se determinó luego de múltiples pruebas variando la altura máxima hasta que se pudo apreciar que no se detectaban nuevas superficies de falla (de área significativa) al continuar aumentando la altura máxima del nodo central, para lo cual se usó el archivo Boundcheck, de acuerdo con las recomendaciones contenidas en el manual de Scoops3D. Una ilustración del archivo Boundcheck de la prueba realizada con parámetros de resistencia menos competentes se muestra en la figura 5.3

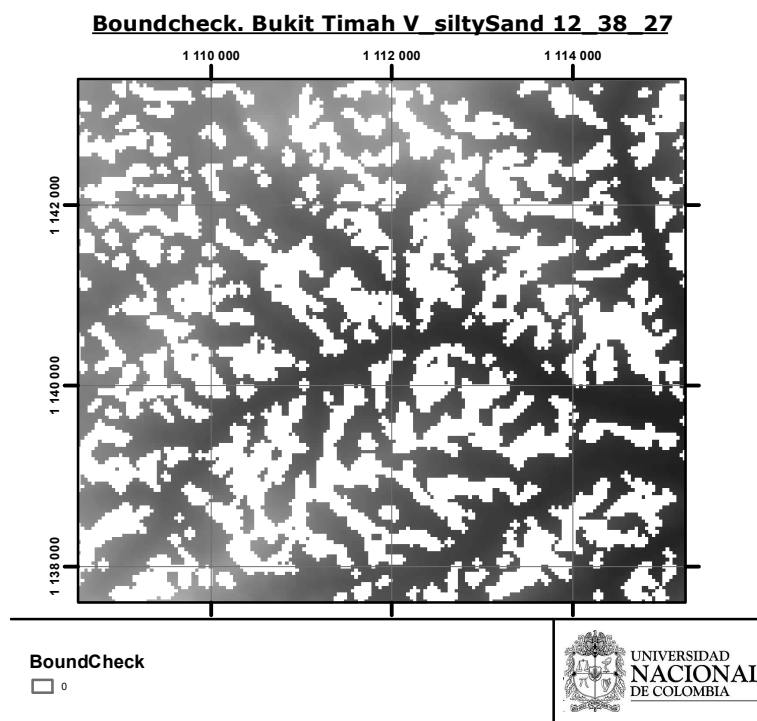
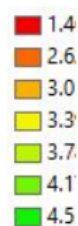


Figura 5.3: Mapa de distribuciones del factor Boundcheck mencionado en la reccin 3.4. Nótese que en su totalidad, el archivo raster Boundcheck está compuesto por valores 0 (blanco) y -9999 (transparente)



Se ha implementado una escala de calor para los valores de factor de seguridad a los píxeles de los archivos fos3D_out.asc, aunque se han obtenido factores de seguridad hasta un valor de 100, a los píxeles con valor superior a 5 se les ha asignado la misma tonalidad de verde.

5.1.3. Parámetros de resistencia.

Los proyectos se han nombrado en función de los parámetros de resistencia usados, separados por el carácter guión bajo y sin incluir decimales, por ejemplo 14_45_26

Los parámetros de resistencia para las pruebas preliminares se han seleccionado con base en las características geológicas descritas para el Miembro Urrao de la Fm. Penderisco en (Calle1987), de los diarios de campo descargados de la base de datos SIMMA y de (estudio de susceptibilidad).

A partir de estas se han consultado parámetros de resistencia resultantes de ensayos realizados a rocas con características litológicas similares.

En el estudio de (singapore)ademas de presentar similitud en las condiciones geológicas de la cuenca hidrográfica de la quebrada la linda, también se describen condiciones atmosféricas similares a las del área de estudio, como precipitaciones anuales entre 2000mm y 3000mm, humedad realtiva de 84% y temperatura promedio de 26 grados cent_igrados. En este trabajo se muestran los parametros de resistencia obtenidos de muestras obtenidas a partir de nucleos de perforacion extraidos de la formación Bukit Timah (granitica) y Jurong (sedimentaria). En ambas formaciones se han analizado varias muestras pertenecientes a distintos horizontes de meteorizacion separados de acuerdo a la denominacion de (little 1969)

Adicionalmente se han realizado pruebas con parámetros correspondientes a Areniscas y Limolitas descas de formaciones etandarizadas como La Fm.Pottsville(Maryland, West Virginia, Ohio. EEUU) y Fm. Repetto (South California .EEUU)

Las muestras tomadas como referencia son:

	Denominación de la muestra	c	phi	gamma
Control	Arenisca Pottsville	14	45	2.6
	Limolita Repetto	34	32	2.34
Fm. Bukit Timah	Limo arenoso grado VI	26	27	2.55
	Arena limosa grado V	13	35	2.66
	Arena limosa grado V (mas profunda)	12	38	2.78
Fm. Jurong	Arena limosa Morada	125	42	2.65
	Arena limosa Morada	55	51	2.7
	Arena limosa Naranja	35	45	2.7
	Arena limosa Morada	225	50	2.75

Tabla 5.1: Parámetros de resistencia empleados en pruebas preliminares

5.1.4. Pruebas Preliminares.

Parámetros de control.

A manera de control, 2 de las corridas preliminares se realizaron empleando los parámetros correspondientes a rocas sanas, es decir a la arenisca de la FM. Pottsville y Limolita de la Fm. Repetto. Los DEM resultantes se muestran en las figuras 5.4 y 5.5. Asimismo, entre los archivos de texto producto de ambas corridas, específicamente el archivo `_out.txt`, se puede observar

siltySand_12_38_27_out.txt

3D POTENTIAL FAILURE - GLOBAL MINIMUM

Bishop's 3D factor of safety:	15.1517
Ordinary 3D factor of safety:	15.1517
Volume (m ³):	3.33350E+04
Horizontal surface area (m ²):	5.78697E+03
Slip surface area (m ²):	5.80648E+03
Weight (kg):	8.66710E+05

34_32_23_out.txt

3D POTENTIAL FAILURE - GLOBAL MINIMUM

Bishop's 3D factor of safety:	12.2276
Ordinary 3D factor of safety:	12.2276
Volume (m ³):	3.33350E+04
Horizontal surface area (m ²):	5.78697E+03
Slip surface area (m ²):	5.80648E+03
Weight (kg):	7.66705E+05

Nótese además que los factores de seguridad mínimos son 15.15 y 12.22 para los ensayos realizados con los parámetros de la Fm. Repetto y Fm. Pottsville respectivamente, y las masas de material removido son de 8,66⁵ Kg y 7,66⁵Kg

Parámetros de prueba: Fm. Bukit Timah.

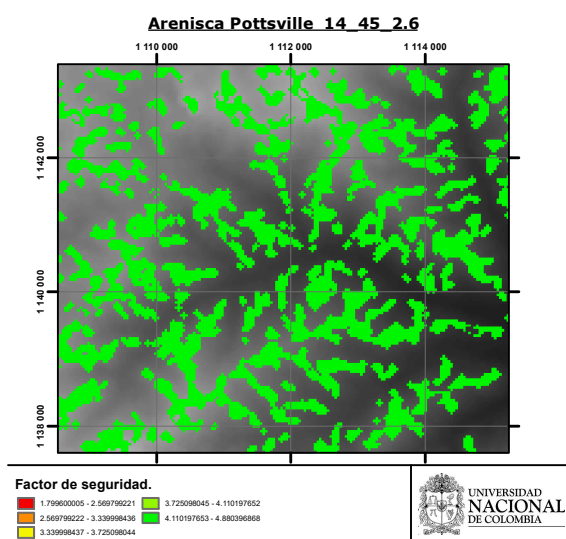


Figura 5.4: Simulación con parámetros tomado de la arenisca de Fm. Pottsville.

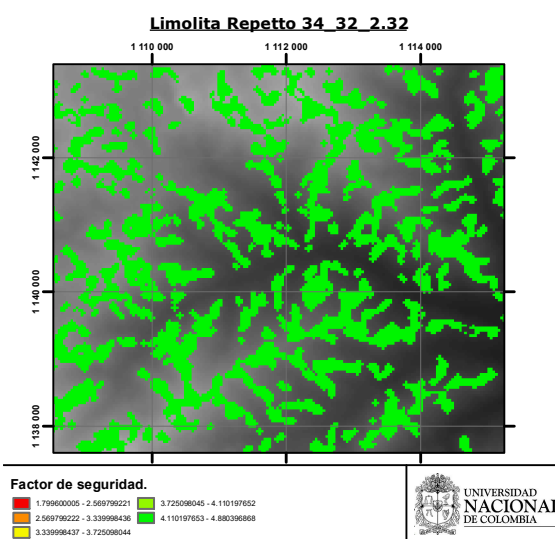


Figura 5.5: Simulación con parámetros tomado de la limolita de Fm. Repetto.

Al usar los parámetros correspondientes a los distintos niveles de meteorización de la formación Bukit Timah, se puede apreciar que a medida que se incrementa el nivel de clasificación, mayores extensiones de área muestran reducción en el factor de seguridad. Se aprecia igualmente que los fondos de los valles así como los filos de las laderas no exhiben ocurrencia de superficies de falla, ello debido a la disminución en las pendientes existentes, aun cuando se ha buscado centros de esfera a alturas superiores a los 17.000 msnm.

Parámetros de prueba: Fm. Jurong.

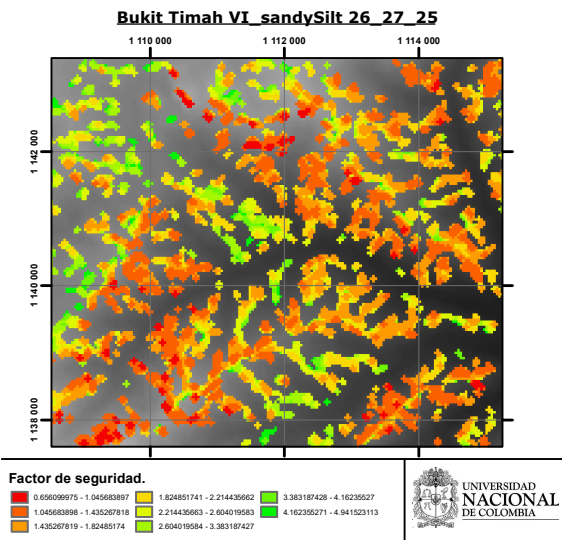


Figura 5.6

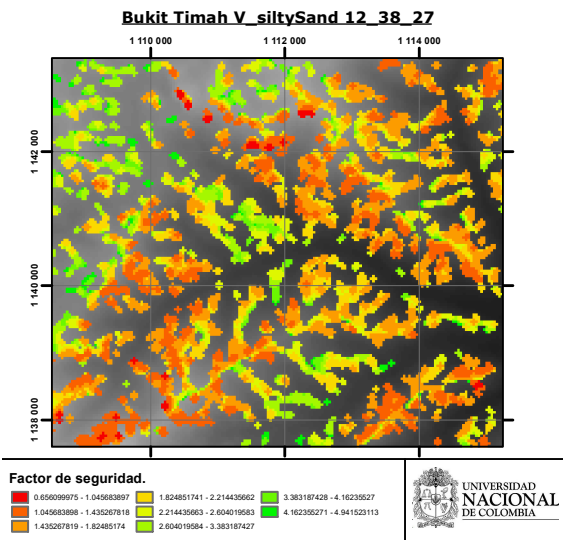


Figura 5.7

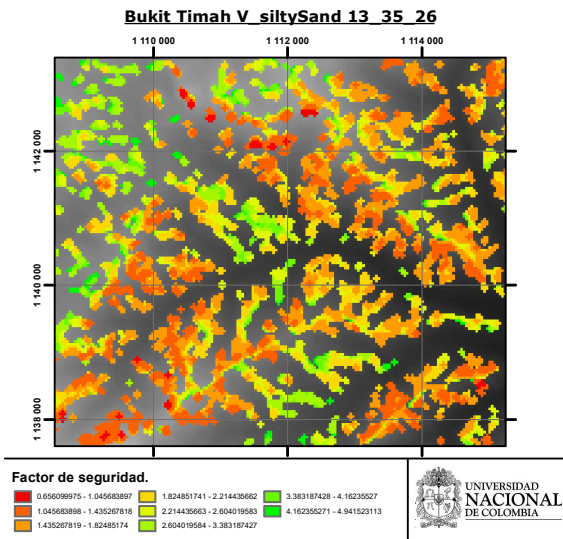


Figura 5.8

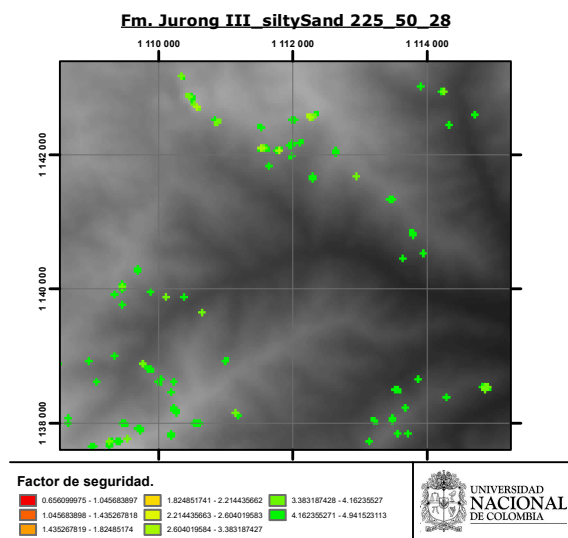


Figura 5.9

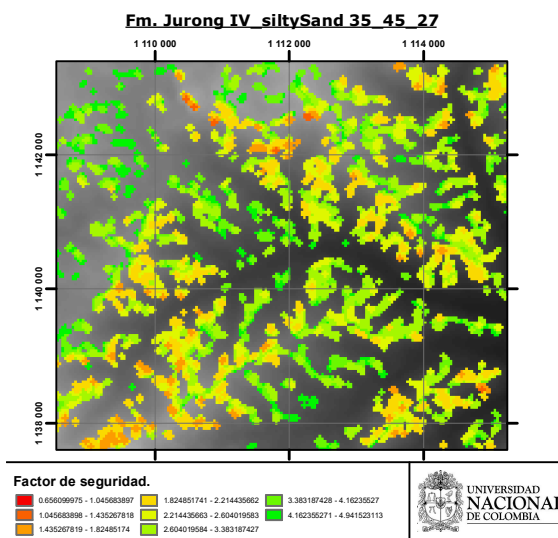


Figura 5.10

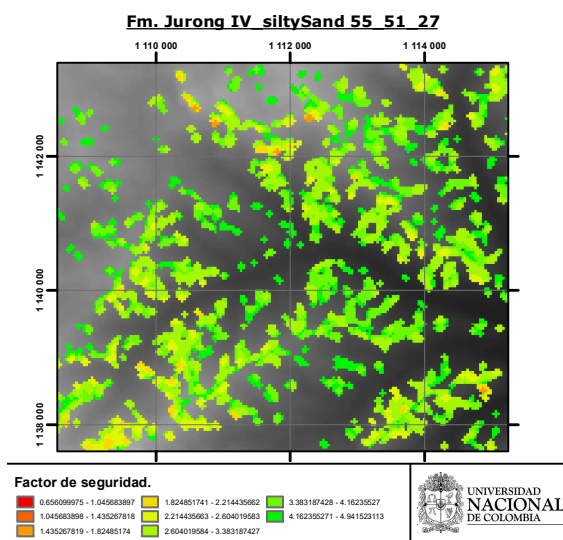


Figura 5.11

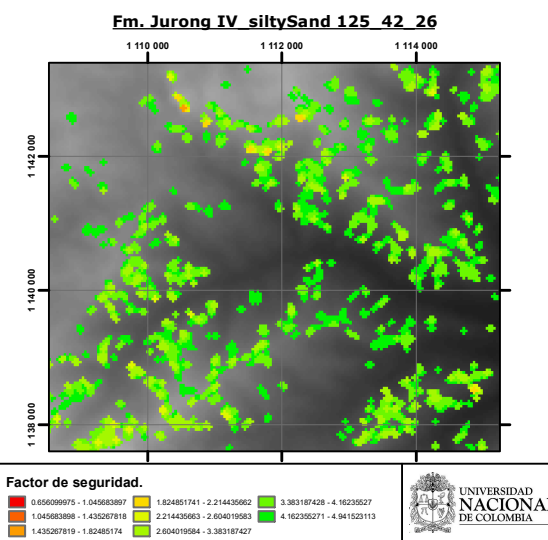


Figura 5.12

Se puede apreciar que en las pruebas realizadas con parámetros correspondientes a muestras más superficiales, la dispersión de colores rojizos y anaranjados es mas predominante sobre la zona de trabajo. Ello indicando una disminución en los factores de seguridad en las laderas de la zona de estudio.

5.1.5. Interpretacion

Es posible es posible apreciar, basado en los resultados obtenidos en la Subsección 5.1.4 que debido a la alta variabilidad de pendientes que se presentan en la zona de trabajo, las cuales varían desde bajas hasta altas y muy altas, sumado a la importante longitud de las laderas . Que el rango de factores de seguridad obtenidos con el software Scoops3D varía desde valores inferiores a 1 que implican falla, hasta valores que tienen como resultado factores de seguridad superiores a 5. Es importante tener en cuenta que esta simulación no contempla factores externos como la sobrecarga de la cobertura vegetal ni la actividad antrópica, que se da fuertemente en la zona y cuya presencia puede implicar la existencia en la zona de agentes químicos que debiliten la agregación de partículas y contribuya en una potencial disminución de la cohesión de los materiales.

Asimismo se puede apreciar que a medida que las pruebas realizadas con materiales que indican un estado mas avanzado del proceso de meteorización, y por ende poseen una mayor proporción de fracción arcillosa y óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, tienen como resultado una marcada disminución en los factores de seguridad. Tal como se puede apreciar al compararlas imágenes XXX y XXX de las pruebas realizadas con los parámetros de resistencia de la Fm. Jurong.

Basado en el origen y tipo de materiales presentes en la cuenca hidrográfica de la Qda. La Linda, se esperaría que los parámetros de resistencia hallados en campo se aproximen considerablemente a los usados para la simulación ilustrada en las figuras 5.10 o 5.11. Es de esperarse en

6 Recorrido de Campo

El recorrido de campo se realizó entre los días 22 y 24 de Noviembre de 2017. La zona recorrida se tuvo como propósito inspeccionar aquellos lugares que mostraron menor factor de seguridad en las pruebas preliminares y apreciar el estado de las unidades geológicas que muestra la cartografía estudiada.

En campo se pudo corroborar la consistencia de la unidad geológica predominante Ksaau (limolita), dicho material se pudo apreciar en todo el recorrido, con leve variación en su grado de meteorización, principalmente en zonas de abundante vegetación. La morfología abrupta de las laderas permitió apreciar abundantes cicatrices de anteriores desprendimientos de material, principalmente en sectores de alta pendiente y en el trazado de la carretera el Carmen- chocó.

Se realizaron 2 estaciones en las cuales se realizó la respectiva toma de muestra, siendo la primera de ellas la que más información proveería en los posteriores ensayos de laboratorio. Para la toma de muestra se tuvo la precaución de seleccionar un lugar que no presentase retrabajamiento del material y en el cual se pudiese observar que el suelo presentase unas condiciones representativas del material observado durante los recorridos realizados. Las muestras tomadas en la segunda estación se tomaron a una profundidad más somera con la intención de, posteriormente, poder obtener los parámetros de resistencia de instancias más avanzadas de meteorización de la limonita. Esto dado que las cicatrices de movimientos en masa observadas aparentaban que aquellos eventos ocurridos se dieron hace un tiempo considerable(a juzgar por el crecimiento nueva cobertura vegetal) no contaron con profundidades considerables de su respectiva superficie de falla. Asimismo, testimonio

obtenido de una habitante del lugar, corrobora que no son frecuentes movimientos que comprendan altos volúmenes de material, habiendo ocurrido el último aproximadamente 5 años antes de la visita de campo.

La estación 1 se realizó en las coordenadas **5.8712778,-76.0848778**, mientras que la estación 2 se realizó en las las coordenadas **5.8612472,-76.0927833** :

Muestras recolectadas

De la estación 1 se obtuvo:

- Muestra al interior de 4 tubos PVC de 2 pulgadas de diámetro y aproximadamente 15 cm de alto.
- 1 Bloque de muestra inalterada de aproximadamente 40cm x 40cm x 30cm.
- 200gr de muestra alterada..

De la estación 2 se obtuvo:

- Muestra al interior de 3 tubos PVC de 2 pulgadas de diámetro y aproximadamente 15 cm de alto.

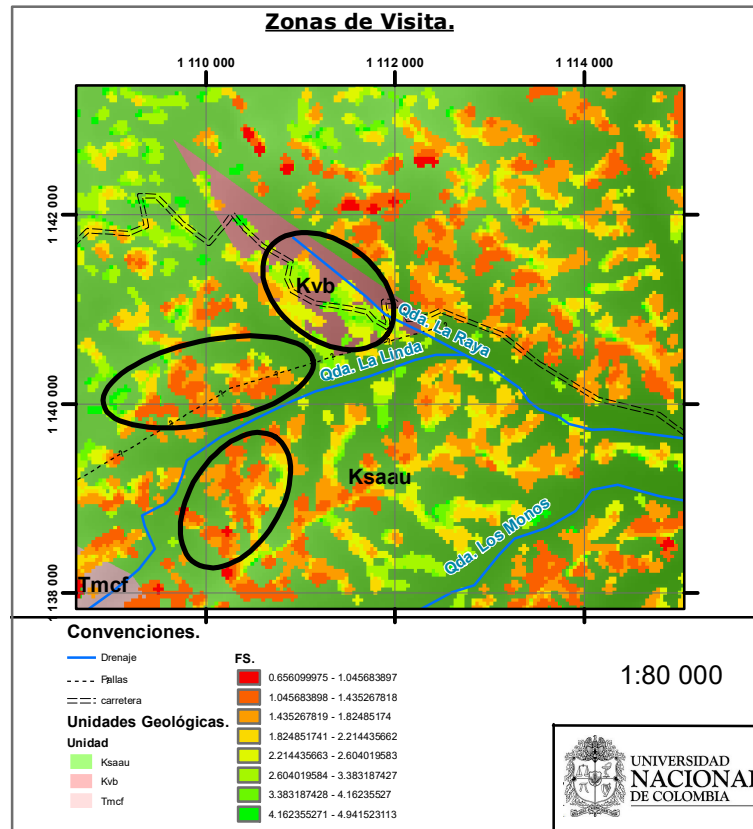


Figura 6.1: Zonas de visita propuestas, se marcaron las zonas con mayor y menor resultado de Factor de Seguridad.

6.1. Conclusiones

6.2. Recomendaciones