

## **METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA**

**Bogotá, D.C. 2012**

## Tabla de contenido

1.	GENERALIDADES .....	4
1.1	PARAMETRIZACIÓN DE VARIABLES .....	5
1.1.1	Ponderación de las variables.....	6
1.2	CALIFICACIÓN HEURÍSTICA POR PANEL DE EXPERTOS.....	6
1.2.1	Parametrización Semicuantitativa .....	6
2.	TRATAMIENTO CARTOGRAFICO.....	6
2.1	FORMATO DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA.....	6
2.2	DISTRIBUCIÓN DE PLANCHAS .....	7
3.	GEOMORFOLOGIA .....	7
3.1	MORFOMETRÍA .....	7
3.1.1	Pendiente .....	8
3.1.2	Concavidad – Convexidad longitudinal .....	8
3.1.3	Longitud de flujo (LF).....	10
3.1.4	Índice de relieve relativo (IRR) .....	11
3.1.5	Forma del área de captación (Kc) .....	12
3.1.6	Densidad de drenaje (DDr).....	14
3.2	MORFOGÉNESIS .....	15
3.2.1	Sistemas morfogénicos .....	15
3.3	MORFODINÁMICA.....	17
3.3.1	Procesos.....	17
4.	GEOLOGIA.....	18
4.1	LITOLOGÍA REGIONAL PARA INGENIERÍA.....	18
4.1.1	Definición.....	18
4.1.2	Importancia del tema .....	18
4.1.3	Forma de obtención.....	18
4.2	DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO .....	19
4.2.1	Definición.....	19
4.2.2	Importancia del tema .....	20
4.2.3	Forma de obtención.....	20
5.	SUELOS .....	21
5.1	DEFINICIÓN.....	21
5.2	IMPORTANCIA DEL TEMA.....	21
5.3	FORMA DE OBTENCIÓN .....	22
5.4	FORMA DE UTILIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE SUELOS .....	22
5.4.1	Textura .....	22
5.4.2	Tipo de arcilla .....	23
5.4.3	Erosión actual.....	23
6.	COBERTURA DE LA TIERRA.....	24
6.1	DEFINICIÓN.....	24
6.2	IMPORTANCIA DEL TEMA.....	24
6.3	FORMA DE OBTENCIÓN .....	25
6.3.1	Coeficiente de Cobertura (KC) .....	25
6.3.2	Profundidad Radicular .....	26
7.	CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA.....	26
8.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	27
9.	USOS Y APLICACIONES DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA .....	27
10.	EQUIPO TÉCNICO .....	28

## Lista de Figuras

Figura 1. Temas para generación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos .....	4
Figura 2. Variables empleadas para la generación del mapa de susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos .....	5
Figura 3. Capas y variables del Tema Geomorfología .....	7
Figura 4. Variables del subtema morfometría.....	7
Figura 5. Proceso cartográfico para obtener el Mapa de pendientes. ....	8
Figura 6. Esquema y expresiones para el cálculo de la curvatura.....	9
Figura 7. Procedimiento cartográfico del mapa de curvatura longitudinal.....	10
Figura 8. Procedimiento cartográfico del mapa de longitud de flujo .....	11
Figura 9. Procedimiento cartográfico para obtener el índice relativo del relieve por área de captación ..	12
Figura 10. Procedimiento cartográfico para obtener mapa de forma de área de captación .....	13
Figura 11. Procedimiento para obtener mapa de densidad de drenaje.....	15
Figura 12. Capas del Tema Geología.....	18
Figura 13. Grado de actividad de las fallas (Tomado de Page y Cline, 1981). ....	20
Figura 14. Variables del Tema Suelo utilizadas para el mapa nacional de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa .....	21
Figura 15. Calculo de la susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos. ....	26
Figura 16. Zonificación de la susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. ....	27

## Lista de Tablas

Tabla 1. Grados de susceptibilidad.....	5
Tabla 2. Relación escala y unidad mínima de mapeo.....	6
Tabla 3. Criterios de calificación empleados para calificar los sistemas morfogénicos según geoformas	16
Tabla 4. Atributos de calificación y ponderación .....	19
Tabla 5. Coeficiente de cobertura para diferentes coberturas vegetales .....	25

## METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

### INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los criterios metodológicos para elaborar la zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa, elaborado por el IDEAM, a partir de experiencias para la actualización del Mapa Nacional de Susceptibilidad a los Movimientos en Masa, a escala 1:500.000 (IDEAM, INGEOMINAS, 2009), y del ajuste y mejoramiento del modelo de susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa a escala 1: 100.000 en áreas piloto (IDEAM, 2009).<sup>1</sup>

### 1. GENERALIDADES

Para la generación de una zonificación de susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos de tierra, se sugiere disponer y utilizar como mínimo la información de los siguientes temas: Geomorfología, Geología, Suelos y Cobertura de la tierra, de acuerdo con la figura 1.

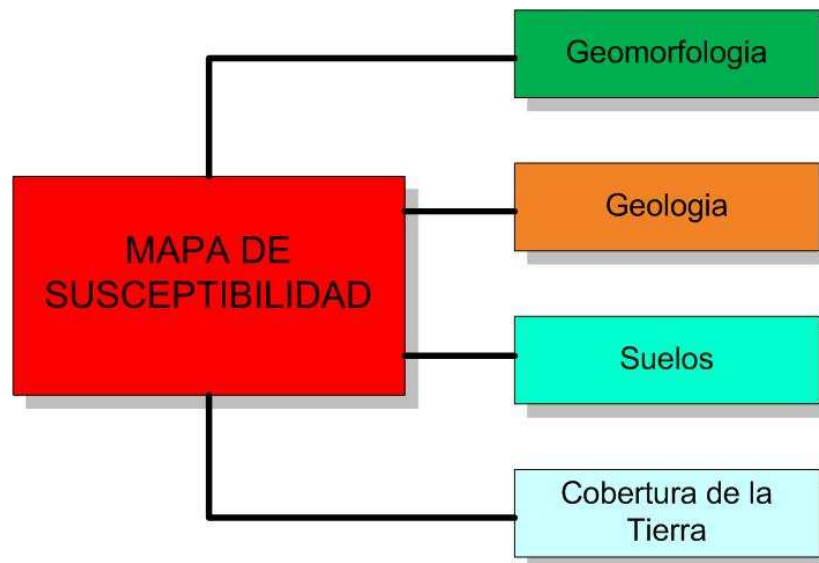


Figura 1. Temas para generación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos

Contando con la información anterior para las áreas de interés, se presenta la siguiente metodología.

Estructurar variables temáticas de geomorfología, geología, suelos y coberturas de la tierra (ver figura 2).

<sup>1</sup> Cítese como: IDEAM. 2012. Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Movimientos en masa. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C., Colombia. 26 p.

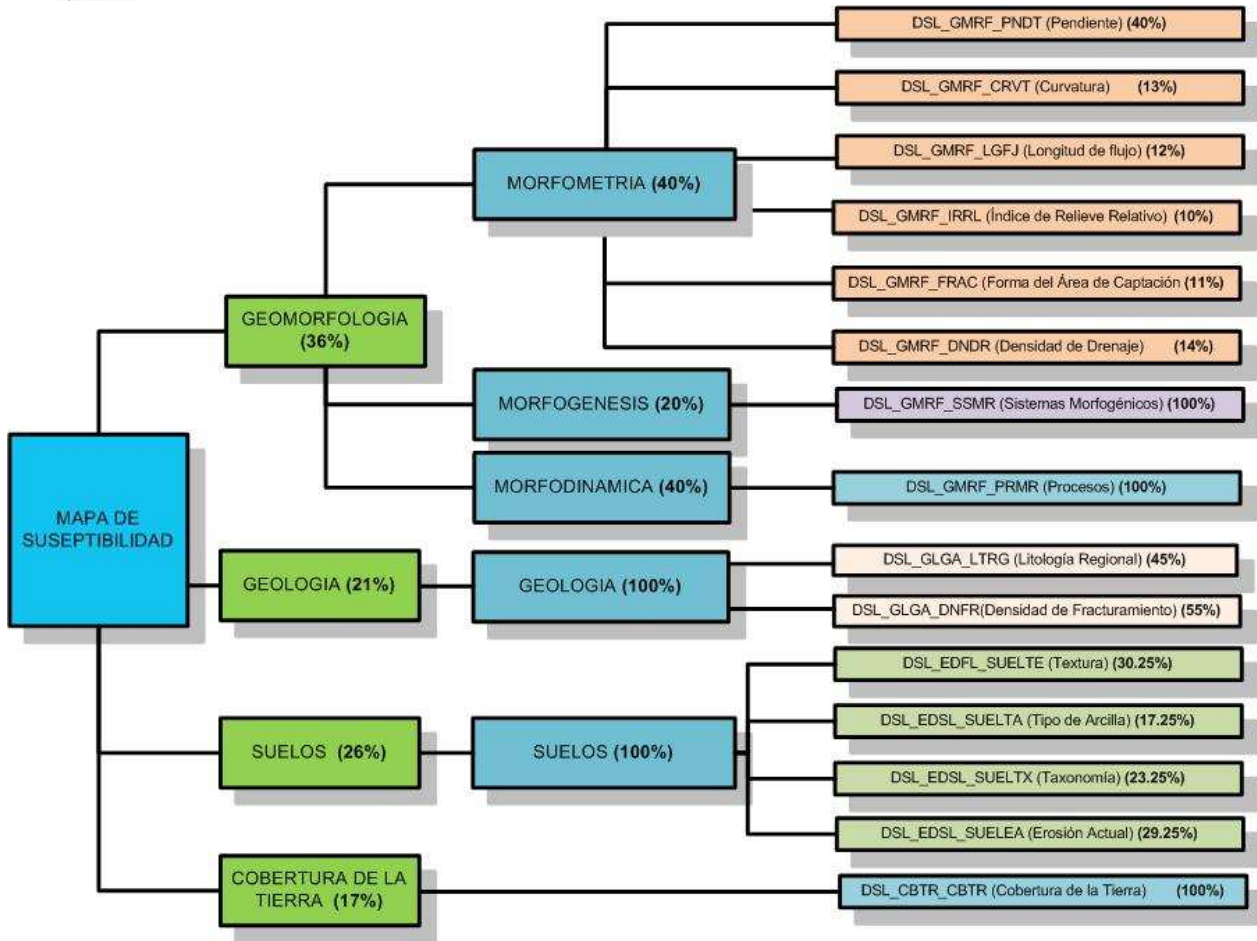


Figura 2. Variables empleadas para la generación del mapa de susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos

### 1.1 Parametrización de variables

Todas las variables se deben parametrizar en términos de susceptibilidad, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Grados de susceptibilidad

CATEGORIA DE LA SUSCEPTIBILIDAD	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD
1	Muy baja susceptibilidad
2	Baja susceptibilidad
3	Moderada susceptibilidad
4	Alta susceptibilidad
5	Muy alta susceptibilidad

### 1.1.1 Ponderación de las variables

La determinación de los pesos ponderados de las variables se realiza a través de la calificación por panel de expertos, en la cual cada experto, en una matriz, compara por pares las variables de cada tema (Ej método PHP), obteniendo de esta manera la ponderación de cada variable.

## 1.2 Calificación heurística por panel de expertos

La calificación de las variables se realiza con diferentes profesionales entre los que se encuentran geólogos, hidrólogos, agrólogos, geógrafos e ingenieros civiles, agrícolas, forestales y catastrales; quienes a partir de su experiencia y conocimiento, asignan el grado de susceptibilidad teniendo en cuenta las categorías presentadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para las siguientes variables.

### 1.2.1 Parametrización Semicuantitativa

Se debe contar con un inventario georreferenciado de deslizamientos mediante trabajos de campo, sensores remotos y/o de fuentes confiables; con el fin de validar y ajustar el grado la susceptibilidad de cada una de las variables.

## 2. TRATAMIENTO CARTOGRAFICO

### 2.1 Formato de Información Cartográfica

Para el análisis y procesamiento de la información del modelo de susceptibilidad, se recomienda usar el formato raster. En caso de que las variables se encuentren en formato vector, se sugiere realizar la “rasterización”, en la que se emplea el tamaño de pixel como unidad mínima de mapeo de acuerdo con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para las diferentes escalas de trabajo.

Tabla 2. Relación escala y unidad mínima de mapeo

N de salidas pgr Módulo Escalar	Criterio 1		Ficas Criterio 2	
	DOL (Ha)	DML (Ha)	DOL (Ha)	DML (Ha)
500000	2500	625	4000	1000
250000	625	156,25	1000	250
100000	100	25	160	40
25000	6,25	1,5625	10	2,5
10000	1	0,25	1,6	0,4
5000	0,25	0,0625	0,4	0,1

DOL = Delimitación optima legible y DML= delimitación mínima legible

## 2.2 Distribución de Planchas

Para la generación de salidas gráficas del mapa de susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos de tierra en diferentes escalas, se debe emplear la grilla definida por el IGAC para las hojas cartográficas que cubren el territorio nacional.

## 3. GEOMORFOLOGIA

Geomorfología incluye las capas de morfometría, morfogénesis y morfodinámica, las cuales se dividen en variables como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

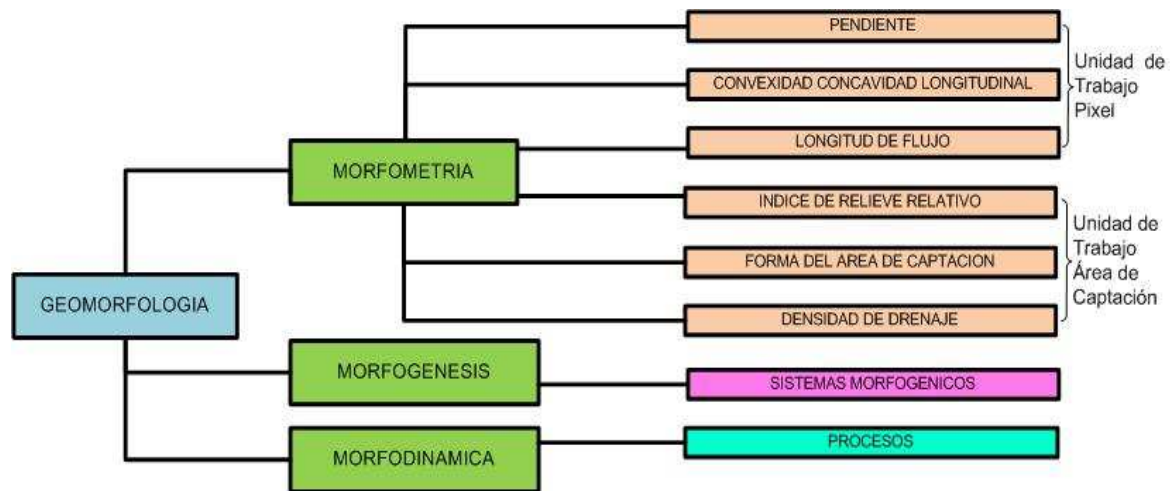


Figura 3. Capas y variables del Tema Geomorfología

### 3.1 Morfometría

Para las variables de morfometría se emplea el modelo digital de elevaciones (DEM), del cual se derivaran las variables pendiente, curvatura longitudinal y longitud de flujo (ver figura 4).



Figura 4. Variables del subtema morfometría

### 3.1.1 Pendiente

#### 3.1.1.1 *Definición*

Se trata de la pendiente de la ladera definida como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje. Para este caso en particular se emplea la pendiente medida en grados.

La pendiente es una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM.

#### 3.1.1.2 *Importancia del tema*

La pendiente está muy relacionada con la aparición de movimientos en masa dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad y es una de las principales condiciones para que ocurra un movimiento en masa. La variable se relaciona directamente con las tensiones de cortes tangenciales y normales en la formación superficial y en suelos, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Jones et al., 1961; Moser et al., 1983; Oyagi, 1984; Mulder, 1991).

Los pasos a seguir para la derivación del mapa de pendientes se explica en la figura 5.

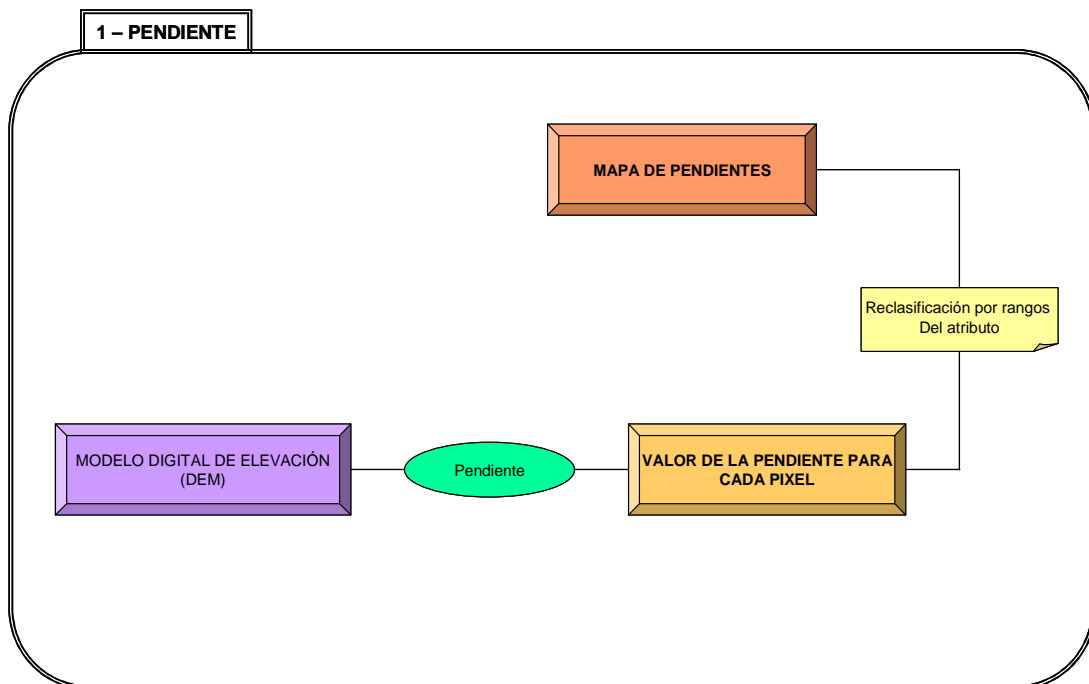


Figura 5. Proceso cartográfico para obtener el Mapa de pendientes.

### 3.1.2 Concavidad – Convexidad longitudinal

#### 3.1.2.1 *Definición*



La curvatura indica el grado de convexidad/concavidad de la superficie del terreno en la dirección de la pendiente (longitudinal). Se determina mediante el radio de curvatura de la celda según un plano vertical. Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de las derivadas de segundo grado de la altitud (6).

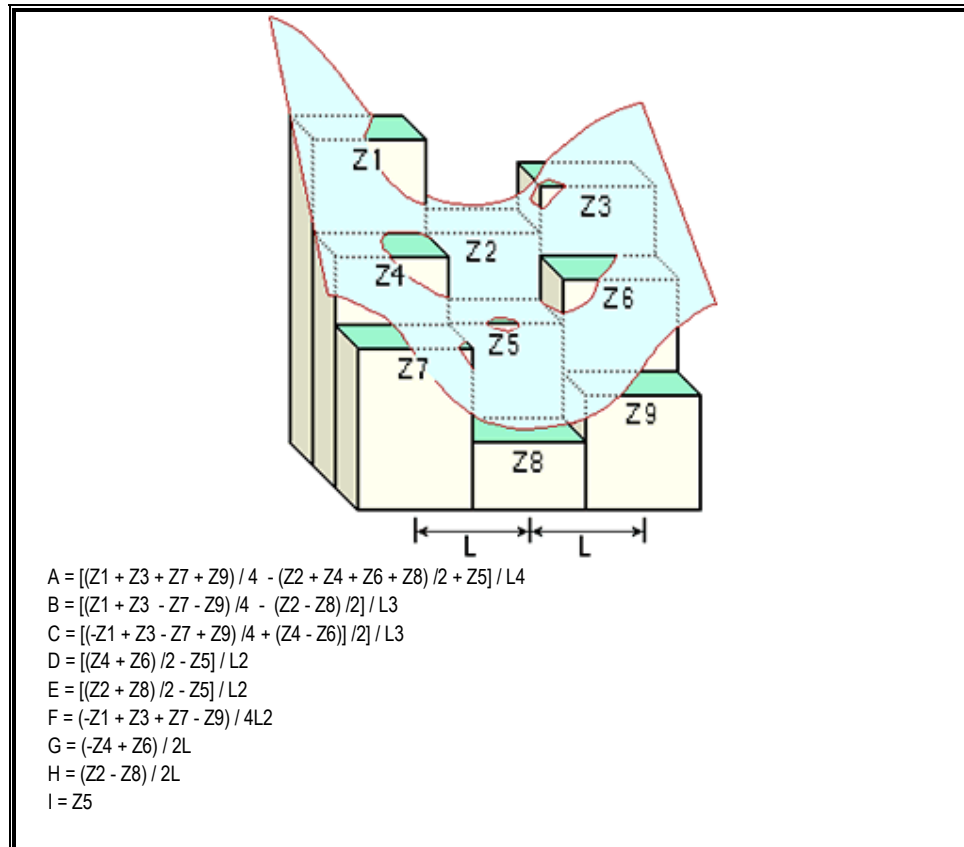


Figura 6. Esquema y expresiones para el cálculo de la curvatura

Determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Se deriva del DEM y adquiere un rango de valores según la zona, que oscila entre - 47 y 49 de unidades 1/100 metros, siendo por tanto, una variable cuantitativa y continua. El valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda.

### 3.1.2.2 Importancia del tema

La variable curvatura longitudinal, indica la efectividad de la topografía para concentrar o escurrir la mayor cantidad de agua de lluvia en un punto determinado de la ladera. Dado que representa la forma de la pendiente o el relieve según la dirección de la máxima pendiente, esta variable afecta a la infiltración y la escorrentía y la aceleración y deceleración del flujo, y por tanto influye en la erosión y depositación.

Los pasos a seguir para la derivación del mapa de concavidad o forma de la pendiente se explica en la figura 6.

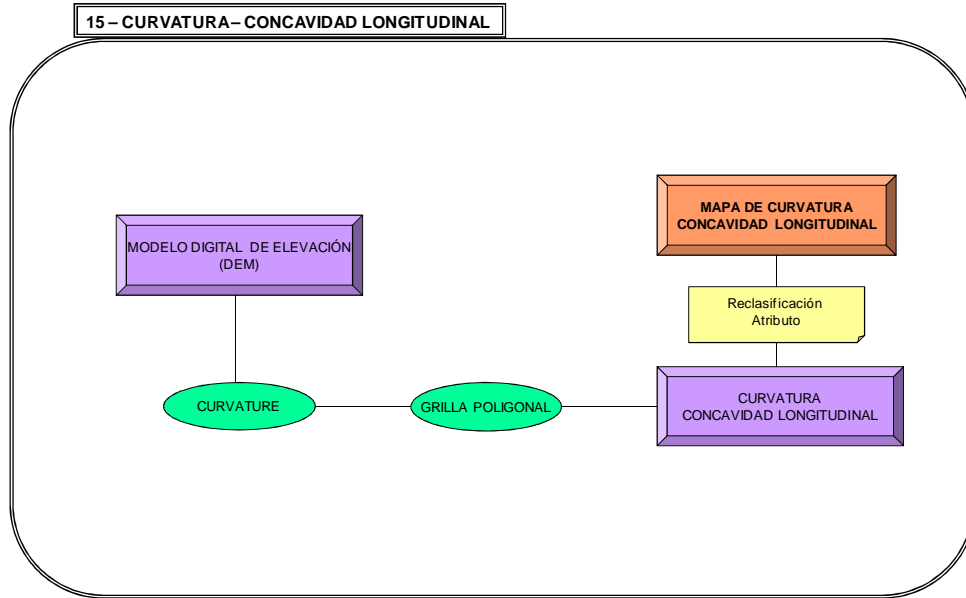


Figura 7. Procedimiento cartográfico del mapa de curvatura longitudinal

### 3.1.3 Longitud de flujo (LF)

#### 3.1.3.1 *Definición*

Se trata de la longitud de flujo acumulado que contribuye a la escorrentía de un área. En este caso se está empleando formato raster lo que significa que el cálculo de la longitud de flujo se hará para cada pixel, teniendo en cuenta la longitud existente aguas arriba de la celda. La longitud de flujo es una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM.

#### 3.1.3.2 *Importancia del tema*

La importancia de esta variable radica en el hecho de que a mayor longitud de flujo la susceptibilidad será menor, ya que el agua de escorrentía tiene mayor facilidad para desplazarse por el cauce lo que va discipando la velocidad y va perdiendo la capacidad para generar deslizamientos.

En la figura 8 se ilustra el procedimiento para la realización del mapa de longitud de flujo

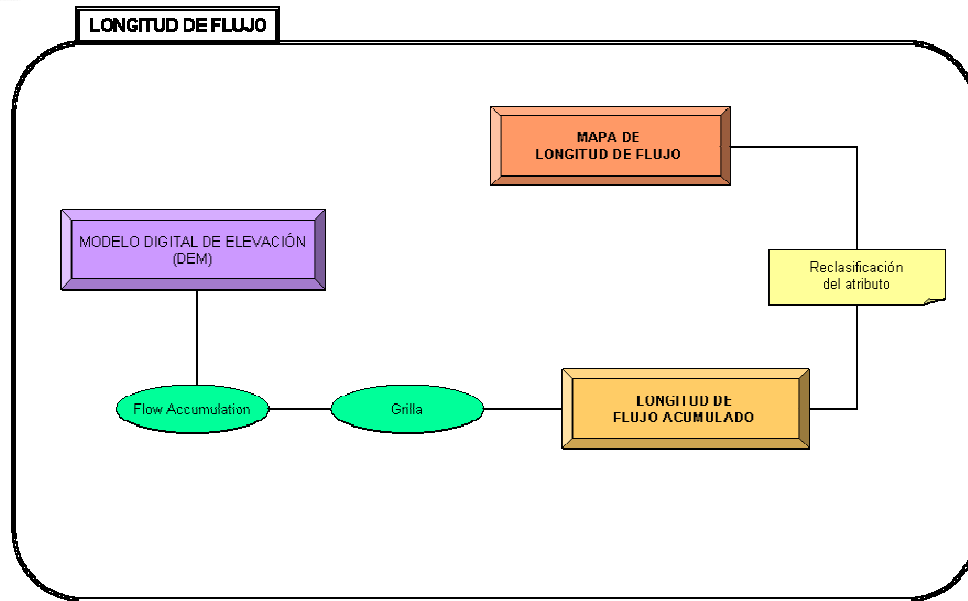


Figura 8. Procedimiento cartográfico del mapa de longitud de flujo

### 3.1.4 Índice de relieve relativo (IRR)

#### 3.1.4.1 *Definición*

Este indicador representa la rugosidad del relieve natural del terreno. Se define como la relación de la mayor diferencia de altura sobre el área de captación determinada.

#### 3.1.4.2 *Importancia del tema*

Indica las características morfométricas de la del área de captación como el relieve o la topografía del terreno.

El cálculo del índice de relieve relativo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$IRR = \frac{ELMAX - ELMIN}{ACAPTACION} \left( \frac{m}{km^2} \right)$$

Donde:

ELMAX = elevación máxima del área de estudio,

ELMIN = elevación mínima del área de estudio

ACAPTACION= área que se está analizando (en este caso son las áreas de captación).

IRR= índice relativo de relieve (Fundación Colombia Mejor, 2007)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Fundación Colombia mejor, (2007). Memoria técnica, Modelo de susceptibilidad general del terreno a movimientos en masa, escala 1:100.000. Bogotá. Carrera 10 No. 20 - 30 Bogotá D.C. - PBX (571) 3527160 - Fax Server: 3527110 - 3527160 Ext: 2110 - 1911 - 1912 - 1913

El procedimiento para obtener el mapa de índice de relieve relativo se presenta en la figura 9.

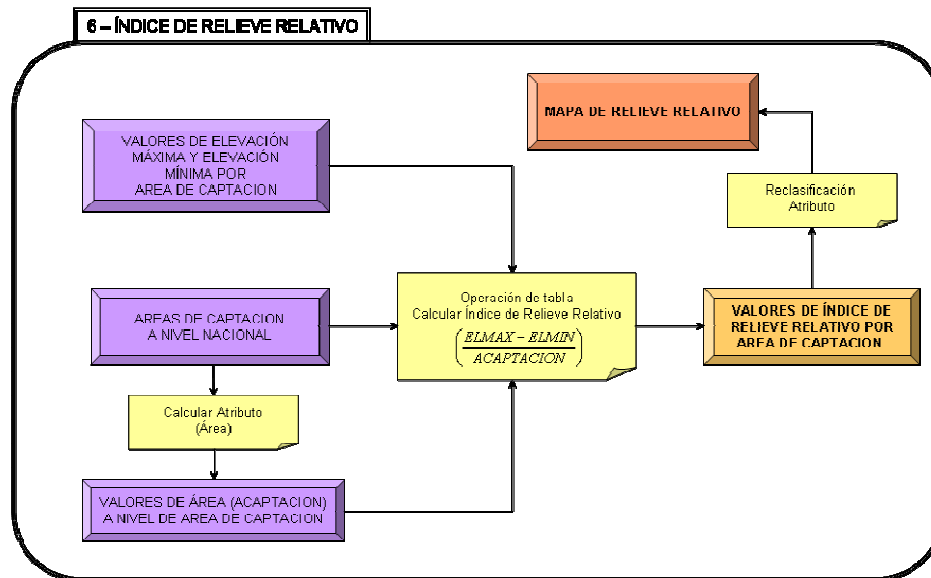


Figura 9. Procedimiento cartográfico para obtener el índice relativo del relieve por área de captación

### 3.1.5 Forma del área de captación (Kc)

#### 3.1.5.1 *Definición*

La forma del área de captación es la configuración geométrica de la zona tal como está proyectada sobre el plano horizontal. La forma del área de captación se encuentra determinada por el índice o relación de forma, que radica en el área de captación sobre el cuadrado de la sumatoria de longitud de drenaje principal a nivel del área de captación.

#### 3.1.5.2 *Importancia del tema*

Tradicionalmente se ha considerado que la forma del área de captación tiene influencia en el tiempo de concentración de las aguas al punto de salida, ya que modifica el hidrograma y las tasas de flujo máximo, por lo que para una misma superficie y una misma tormenta, los factores mencionados se comportan de forma diferente entre un área de forma redondeada y una alargada. Los volúmenes escurridos en zonas alargadas son más uniformes a lo largo del tiempo, en cambio, en zonas redondeadas el agua tarda menos en llegar a la salida, en donde se concentra en un tiempo relativamente corto.

Siendo más susceptible a deslizamiento las áreas de captación redondeadas por acumular de manera más rápida el agua lo cual puede generar inestabilidad de los taludes.

Para su obtención, se emplea el índice de Gravellius o el coeficiente de compacidad, que corresponde al valor de dividir el perímetro del área de captación por la longitud de la circunferencia de un círculo que tiene como área la misma del área de captación. Para hallarlo se utiliza la siguiente fórmula:

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{A^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

P= Perímetro del área de captación (Km)

A=Área del área de captación (Km<sup>2</sup>)

Kc= Coeficiente de compacidad

Entre más irregular sea el área de captación mayor será su coeficiente de compacidad. Un área de captación circular posee el coeficiente mínimo, cercano a uno, o uno, si es totalmente circular. Las crecientes serán más rápidas, con tiempos de concentración más cortos, cuando la forma del área de captación tiende a ser circular y su coeficiente de compacidad es cercano a uno.

En la figura 10, se presenta el procedimiento para obtener el mapa de forma del área de captación.

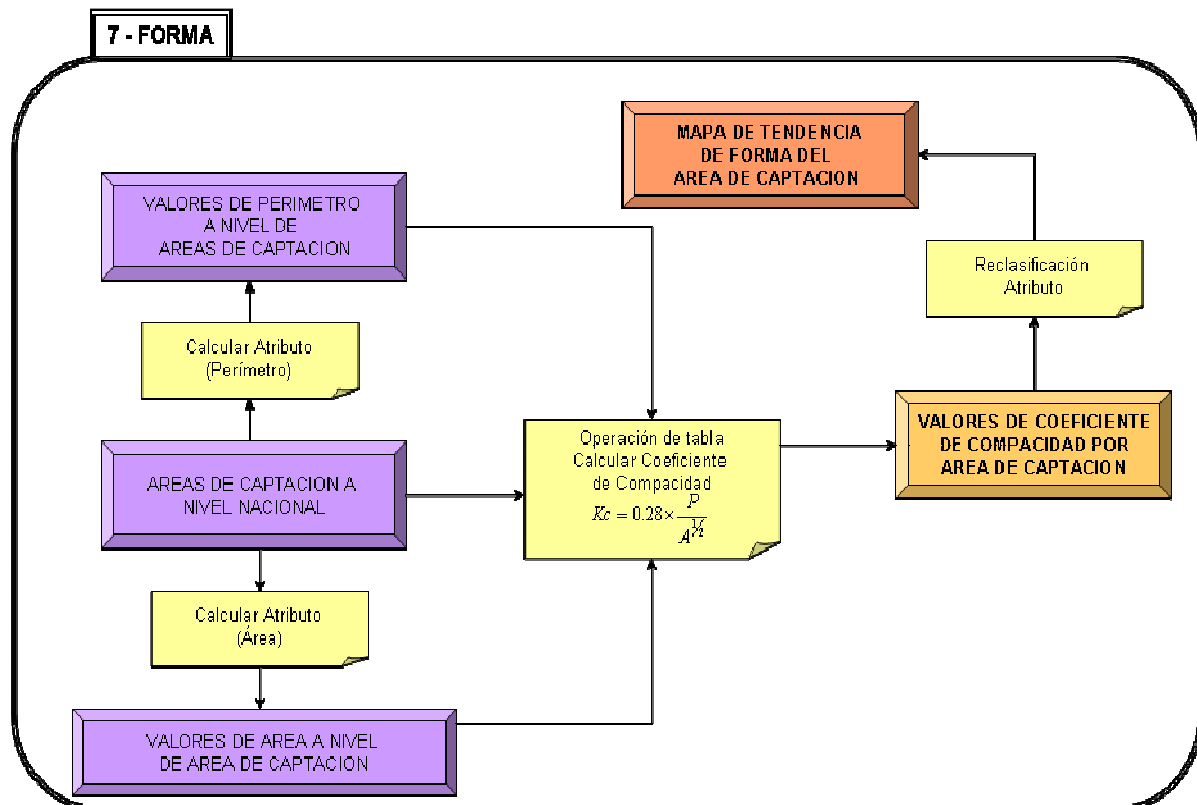


Figura 10. Procedimiento cartográfico para obtener mapa de forma de área de captación

### 3.1.6 Densidad de drenaje (DDr)

#### 3.1.6.1 *Definición*

Los factores que controlan la densidad de drenaje son la litología, la permeabilidad del suelo, la capacidad de infiltración, la cobertura y tipo de la misma<sup>3</sup>. La densidad de drenaje constituye un indicador del potencial de erosividad intrínseco a la zona de estudio.

Corresponde la relación de la sumatoria de longitud de drenaje total por área de captación sobre el área de captación.

Generalmente toma valores entre 0.5 para áreas de captación con drenaje pobre y alcanza valores de hasta 3 para áreas de captación con redes de drenaje muy desarrolladas<sup>4</sup>.

#### 3.1.6.2 *Importancia del tema*

La densidad de drenaje indica la producción de agua y sedimentos en el área de captación, lo cual señala que a mayor densidad de drenaje mayor es la posibilidad de evacuación de agua del área de captación, y menor es la susceptibilidad a deslizamientos.

Para calcular la densidad de drenaje, se emplea la siguiente expresión:

$$DD = \frac{LD}{ACAPTACION} \left( \frac{km}{km^2} \right)$$

Donde:

LD = Longitud total de las corrientes

ACAPTACION= Área del área de captación

DD = Densidad de drenaje

En la figura 11, se presenta el procedimiento para obtener el mapa de densidad de drenaje.

<sup>3</sup> UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA, 2009. Curso "Manejo integrado de cuencas hidrográficas". Departamento de geografía, Facultad de ciencias. Uruguay.

<sup>4</sup> DAL-RE TENREIRO, R y otros. (2003). Pequeños embalses de uso agrícola. Mundi-pensa. Madrid.

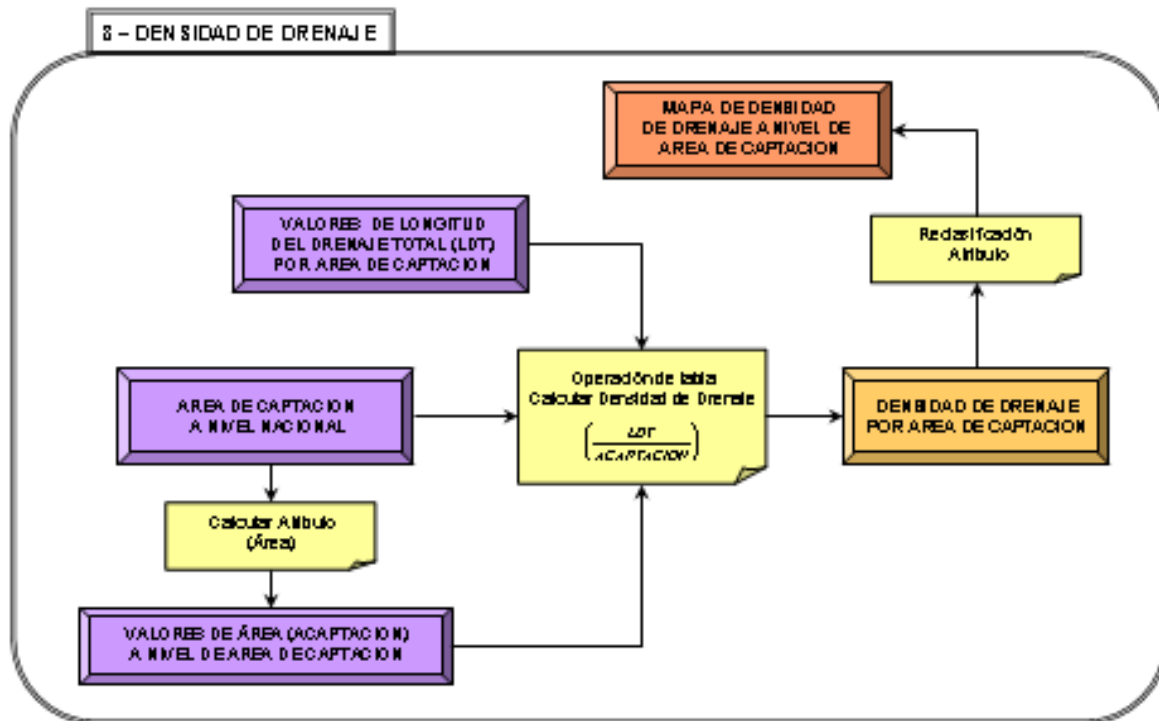


Figura 11. Procedimiento para obtener mapa de densidad de drenaje

### 3.2 Morfogénesis

La morfogénesis explica el origen de una geofoma y para su obtención se utiliza el mapa geomorfológico.

#### 3.2.1 Sistemas morfogénicos

##### 3.2.1.1 *Definición*

Los sistemas morfogénicos explican el origen de la gran variedad de geofomas existentes en el territorio nacional; cada sistema morfogénico refleja la reunión de variables litológicas, topográficas, bioclimáticas, cobertura vegetal y uso, y cada unidad tiene una dinámica y evolución particulares<sup>5</sup>. El IDEAM publicó recientemente el Mapa “Sistemas Morfogénicos del Territorio Colombiano” (2010), escala 1:500.000, documento que se convierte en un referente para la clasificación de las geofomas y los procesos que intervienen en su modelado.

<sup>5</sup> [http://intranet.ideam.gov.co:8080/openbiblio/catalogo\\_virtual/c\\_catalogov.php](http://intranet.ideam.gov.co:8080/openbiblio/catalogo_virtual/c_catalogov.php)

### 3.2.1.2 Importancia del tema

La importancia de la variable sistemas morfogénicos está dada por la cantidad de información que incluye implícitamente como, variables litológicas, topográficas, bioclimáticas, cobertura vegetal y uso, y la dinámica y evolución particular.

Para realizar la calificación de esta variable el Ideam suministrará el Shapefile de tipo polígono escala 1:500.000, cuyos atributos principales son macrounidad y sistemas morfogénicos, el cual, está compuesto por la unión de sistema 1 (correspondiente a geosistema), sistema 2 (correspondiente a sistemas morfogénicos) y sistema 3 (correspondiente a subsistemas morfogénicos).

### 3.2.1.3 Forma de obtención

Como se mencionó, este mapa es el resultado de la unión de variables litológicas, topográficas, bioclimáticas, cobertura vegetal y uso, y cada unidad tiene una dinámica y evolución particulares, para emplear la información de sistemas morfogenicos como variable dentro del mapa de susceptibilidad a deslizamientos, se debe tener en cuenta la predominancia o la ocurrencia de procesos acumulativos o erosivos relacionándolos con la topografía.

**Tabla 3. Criterios de calificación empleados para calificar los sistemas morfogénicos según geoformas**

GRADO SUSCEPTIBILIDAD		CRITERIO 1	CRITERIO 2
0	Nula	Predominan procesos acumulativos formas planas.	Topografía plana
1	Muy baja	Predominan procesos acumulativos, se presentan formas con altura relativa menor.	Topografía inclinada
2	Baja	Ocurrencia de procesos acumulativos y erosivos. Formas altas y bajas con altura relativa media.	Topografía con pendientes suaves
3	Moderada	Predominan procesos erosivos, algunos procesos acumulativos. Formas altas y bajas, altura relativa moderada.	Topografía con pendientes moderadas
4	Alta	Predominan procesos erosivos, predominan formas altas con pendiente suave a abrupta y altura relativa considerable.	Topografía abrupta
5	Muy alta	Predominan procesos erosivos. Formas abruptas y de altura relativa considerable.	Topografía abrupta. Alternancia litológica



### 3.3 Morfodinámica

#### 3.3.1 Procesos

##### 3.3.1.1 *Definición*

El relieve terrestre va evolucionando en la dinámica del ciclo geográfico mediante una serie de procesos constructivos y destructivos que se ven permanentemente afectados por la fuerza de gravedad que actúa como equilibradora de los desniveles; es decir, hace que las zonas elevadas tiendan a caer y colmatar las zonas deprimidas. Estos procesos hacen que el relieve transite por diferentes etapas. Los desencadenantes de los procesos pueden categorizarse en cuatro grandes grupos:

- *Factores geográficos:* El relieve se ve afectado tanto por factores bióticos como abióticos, de los cuales se consideran propiamente geográficos aquellos abióticos de origen exógeno, tales como el relieve, el suelo, el clima y los cuerpos de agua. El clima con sus elementos tales como la presión, la temperatura y los vientos. El agua superficial con la acción de la escorrentía, la acción fluvial y marina. Los hielos con el modelado glacial, entre otros. Son factores que ayudan al modelado, favoreciendo los procesos morfodinámicos.
- *Factores bióticos:* El efecto de los factores bióticos sobre el relieve suele oponerse a los procesos del modelado, especialmente considerando la vegetación.
- *Factores geológicos:* tales como la tectónica, el diastrofismo, la orogénesis y el vulcanismo, son procesos constructivos y de origen endógeno que se oponen al modelado e interrumpen el ciclo geográfico.
- *Factores antrópicos:* La acción del hombre sobre el relieve es muy variable, dependiendo de la actividad que se realice, en este sentido y como comúnmente pasa con el hombre es muy difícil generalizar, pudiendo incidir a favor o en contra de los procesos morfodinámicos.

##### 3.3.1.2 *Importancia del tema*

La importancia de los procesos morfodinámicos, radica en que son los encargados del modelado del relieve y adicionalmente se puede inferir que a mayor presencia de procesos la zona tiene mayor susceptibilidad a presentar deslizamientos.

##### 3.3.1.3 *Forma de obtención*

Al igual que morfogénesis, esta variable se deriva del mapa de sistemas morfogenéticos, pero en este caso se tienen en cuenta la presencia o no de procesos morfodinámicos, a mayor frecuencia de morfodinámica, aumentan la susceptibilidad a deslizamientos.

## 4. GEOLOGIA

La geología incluye las capas de litología regional para ingeniería y densidad de fracturamiento, como se presenta en la figura 12.



Figura 12. Capas del Tema Geología

### 4.1 Litología Regional para Ingeniería

#### 4.1.1 Definición

De acuerdo con Ingeominas (2009), esta capa refleja las características de los diferentes tipos de rocas y depósitos que se agrupan teniendo en cuenta el tipo de roca (ígneas, metamórficas y sedimentarias) así como sus características texturales y sus propiedades geomecánicas.

#### 4.1.2 Importancia del tema



Quizás es la base más importante para poder establecer las unidades a tener en cuenta en la distribución de los diferentes tipos de materiales a lo largo del territorio colombiano. Cada uno de estos materiales presenta propiedades intrínsecas y ofrece diferentes respuestas ante los agentes que actúan para su alteración y así determinar la susceptibilidad de cada uno de ellos a que se produzca un movimiento en masa.

#### 4.1.3 Forma de obtención

En la ponderación de la calidad de las rocas se consideran atributos de composición textura/fábrica, edad, origen y resistencia mecánica, como atributos a calificar y/o factores de agrupación, tal como se indica en la Tabla 4. La resistencia se toma como un parámetro referente de calidad, tomando en consideración rangos de resistencia para diferentes grupos de materiales. Tal como se presenta en la tabla 4 y tomando como base las unidades crono estratigráficas, las rocas ígneas se califican según sus atributos de textura/fábrica y resistencia. Las rocas sedimentarias se califican según rangos típicos de resistencia, y las rocas metamórficas según la textura y la resistencia mecánica.

Tabla 4. Atributos de calificación y ponderación

TIPO DE ROCA	Composición	Textura / Fabrica	Edad	Origen	Resistencia mecánica
Rocas ígneas					
Rocas sedimentarias					
Rocas metamórficas					
Depósitos					

	Factor de agrupación en el mapa
	Atributo a Calificar

## Depósitos

Los depósitos en general son los que presentan menos resistencia y mayor susceptibilidad a los movimientos en masa. Para la ponderación de los depósitos se tiene en cuenta la resistencia y su comportamiento en taludes y laderas del país, a partir de la información existente en la “Clasificación regional de amenaza relativa de movimientos en masa en Colombia” (Ingeominas, 2002).

## 4.2 Densidad de Fracturamiento

### 4.2.1 Definición

La condición y estado de fracturamiento de las rocas se asocia particularmente, a las zonas de mayor deformación tectónica, que corresponde a las fallas geológicas y plegamientos de las rocas sedimentarias. En el caso de las fallas geológicas es de esperar que la deformación y fracturamiento se intensifique con las tasas de desplazamiento de las fallas, mientras que en el caso de los pliegues el mayor fracturamiento se concentra en las crestas donde predominen las rocas frágiles.

Se trata de presentar un modelo que de una idea razonablemente confiable sobre la distribución y densidad de discontinuidades estructurales y/o mecánicas de las rocas, bien sea, las que se relacionan con su forma de yacimiento (planos de estratificación, pliegues, foliación, clivaje, relajación, etc.), como las que tienen que ver con el comportamiento frágil o dúctil de las rocas, frente a las fuerzas tectónicas (diaclasas, zonas de cizallamiento y fallas geológicas). Se trata de visualizar este modelo de manera sencilla, interpretándolo desde el punto de vista de su influencia sobre el estado y condición de fracturamiento de los macizos rocosos, desde el punto de vista geomecánico.

Si bien el patrón estructural revela únicamente la expresión superficial de las zonas de falla, esta expresión es suficientemente representativa de la zona en profundidad afectada por los movimientos en masa. Así mismo, la orientación de las zonas de falla guarda una cierta relación con la orientación de los sistemas de fracturas en el nivel regional.

#### 4.2.2 Importancia del tema

El grado de fracturación y plegamiento prepara los materiales de la corteza terrestre para que sobre ellos se desarrollen los procesos, dentro de los cuales están los movimientos en masa y por tratarse de un análisis de susceptibilidad se considera que tiene importancia especialmente en el orógeno andino.

#### 4.2.3 Forma de obtención

##### 4.2.3.1 *Alternativas consideradas por Ingeominas*

De acuerdo con las observaciones de los profesionales de geología, se toman todas las fallas, lineamientos y pliegues del Mapa Geológico de Colombia (MGC 2007) y se calcula la densidad de fallas con un radio de 5000 m y resolución de 1000 m; el resultado obtenido se categoriza en 5 intervalos, para representar la distribución y densidad de fracturas. Con este insumo se proponen las siguientes alternativas:

1. En la misma capa se analizan las fallas, pliegues y lineamientos, sin asignar pesos a los elementos.
2. En la misma capa se analizan las fallas, pliegues y lineamientos, y se asignan pesos a los elementos teniendo en cuenta los siguientes criterios analizados y discutidos por el grupo de geólogos:
  - a. Tasas de desplazamiento de las estructuras con deformaciones en el Cuaternario, determinadas por Paris et al. (2000) y el grupo de Amenazas Sísmica de Ingeominas.
  - b. Se asume que a mayor tasa de desplazamiento hay un mayor grado de fracturamiento. La figura 13 indica el grado de actividad de las fallas a partir de la relación tiempo - desplazamiento (Page y Cline, 1981), la cual también es utilizada para inferir el grado de fracturamiento.

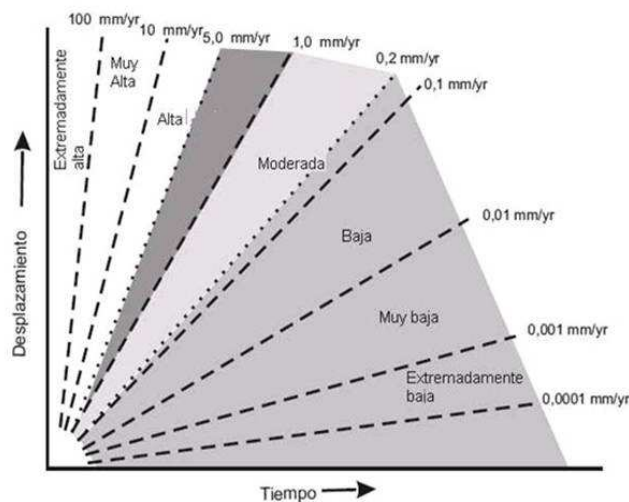


Figura 13. Grado de actividad de las fallas (Tomado de Page y Cline, 1981). En tonos de grises se indican los rangos seleccionados para la definición de los rangos.

c. De acuerdo con las tasas de desplazamiento definidas para las fallas con deformaciones en el Cuaternario, se asignaron pesos a los elementos, definiendo 5 rangos:

- Fallas con tasas de desplazamiento > 1.0 mm/yr :peso asignado 10
- Fallas con tasas de desplazamiento entre 0.2 - 1.0 mm/yr: peso asignado 9
- Fallas con tasas de desplazamiento < 0.2 mm/yr: peso asignado 8
- Resto de fallas de las cuales no se conoce su tasa de desplazamiento: peso asignado 7
- Pliegues: peso asignado 6.

Estos valores representan una división jerárquica del estado de fracturamiento de la roca, asociado a los principales elementos estructurales (fallas y pliegues) tomados para el estudio.

## 5. SUELOS

### 5.1 Definición

El suelo, es la capa más superficial de la corteza terrestre, que resulta de la interacción de los factores y los procesos formadores de suelos.

Las variables del tema de suelos, se obtienen de los mapas de suelos, publicados por el Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” -IGAC-, los cuales incluyen características físicas de suelos, tales como: textura, estructura, consistencia, materia orgánica, profundidad total del perfil de suelos, tipo de arcilla, capacidad de almacenamiento o retención de agua del suelo, discontinuidad textural, drenaje natural, taxonomía y erosión actual.

En la figura 14, se presentan las variables de suelos parametrizadas y utilizadas para la generación del mapa nacional de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa.

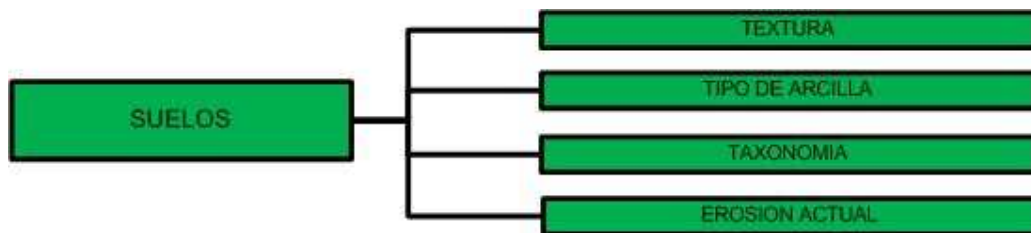


Figura 14. Variables del Tema Suelo utilizadas para el mapa nacional de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa

### 5.2 Importancia del tema

El suelo, al igual que las coberturas de la tierra son la entrada y el regulador inicial de la precipitación pluvial en el ecosistema. El movimiento del agua (escurrimiento o flujo superficial, infiltración, capilaridad, percolación, entre

otros), tiende a modificar el estado de la materia y la energía del suelo, afectando sus propiedades y esfuerzos, pero sin alterar su naturaleza.

La determinación de las variables físicas de suelos, muestran el comportamiento a lo largo del perfil de suelos; donde, cada uno de ellos presenta diferentes características y cualidades que lo hacen complejo, en la determinación del comportamiento de la estabilidad.

### 5.3 Forma de obtención

Con el fin de determinar las variables físicas de los suelos, se debe consultar la documentación oficial Suelos de Colombia, publicada por el Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” –IGAC y otros estudios a nivel regional realizados por universidades y/o las autoridades ambientales.

Las variables a tener en cuenta se refieren a perfiles y unidades cartográficas de suelos, en las cuales es de interés la siguiente información: textura, estructura, consistencia, materia orgánica, profundidad total del perfil de suelos, tipo de arcilla, capacidad de almacenamiento o retención de agua del suelo, discontinuidad textural, drenaje natural, taxonomía y erosión actual, las cuales determinan la susceptibilidad a los movimientos en masa.

### 5.4 Forma de utilización de las variables de suelos

Cada una de las variables se calificarán en términos de susceptibilidad a los movimientos en masa.

#### 5.4.1 Textura

##### 5.4.1.1 *¿Qué es?*

La textura hace referencia la cantidad relativa de las diferentes partículas de suelo de tamaño menor de 2 mm de diámetro (arenas, limos y arcillas).

##### 5.4.1.2 *¿Por qué es importante?*

Suárez (1.998), menciona que el término textura, se refiere al arreglo físico de los granos o partículas. Este arreglo, junto con la mineralogía, el grado de meteorización, y la estructura de discontinuidades determina el comportamiento ingenieril de la mayoría de los suelos residuales. La microestructura incluye la microfábrica, la composición y la fuerza entre partículas. La cementación de grupo de partículas es responsable de altas relaciones de vacíos, bajas densidades, altas resistencias, baja compresibilidad y alta permeabilidad.

La textura, se encuentra relacionada con la velocidad de infiltración, retención y almacenamiento de humedad, aireación (difusión de gases), permeabilidad, intemperismo, volumen explorado por las raíces, manejo de suelos, fertilidad y nutrición mineral entre otras.

## 5.4.2 Tipo de arcilla

### 5.4.2.1 *¿Qué es?*

De acuerdo con Besoain (1.985), la arcilla es un constituyente fundamental que cuantifica la mayoría de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo; con tamaño menor de  $2\mu$ , incluyendo minerales primarios de actividad muy reducida o casi nula. Las propiedades de la arcilla se relacionan con su naturaleza coloidal y se refieren a una superficie específica alta y características como plasticidad, adherencia, contracción, tixotropía y otras. Estas propiedades influyen directamente sobre el comportamiento del suelo.

### 5.4.2.2 *¿Por qué es importante?*

Capra (2003) menciona que los paleosuelos contienen arcilla en una proporción elevada (hasta el 22%), por lo que caen en la categoría de los suelos altamente susceptibles a movimientos en masa y que originan flujos de escombros cohesivos que, por su elevada competencia y cohesión, se pueden desplazar sobre grandes distancias.

Por lo tanto, es evidente como las características del tipo de suelo o roca determinan el tipo de movimiento en masa. En particular, el suelo volcánico, por su reducido espesor y bajo contenido en fracción arcillosa, da origen a flujos de lodo de limitado espesor y alcance, cuya localización, en correspondencia con lluvia abundante, depende casi exclusivamente de la pendiente de la ladera.

Suárez (1998), señala que las arcillas son esencialmente hidróxidos de aluminio microcristalinos formando capas de silicatos, los cuales tienen una estructura en capas o partículas laminares. De las propiedades de las arcillas, la capacidad de intercambio catiónico generalmente controla su comportamiento frente al agua y su inestabilidad. A mayor capacidad de intercambio catiónico la arcilla es más inestable.

En general, el tipo de mineral de arcilla presente y el porcentaje, en proporción con el total de minerales afecta en forma considerable el comportamiento del suelo. Las otras propiedades de las arcillas, como son sus características de expansión y contracción siguen un mismo patrón ante las propiedades de plasticidad, entre más plástico el material mayor su potencial de expansión y menor su resistencia al esfuerzo cortante.

La importancia del tipo de arcilla, en los movimientos en masa, radica en el grado de estabilidad que esta presenta cuando entra en contacto con el agua, ya sea que se contraiga, se expanda o forme grietas, como el caso de las arcillas que tienen los Vertisoles.

## 5.4.3 Erosión actual

### 5.4.3.1 *¿Qué es?*

La erosión del suelo es desprendimiento, transporte y depositación del material superficial por acción del agua, el viento, el hielo o el hombre.

### 5.4.3.2 ¿Por qué es importante?

La erosión, es importante porque identifica y evalúa el tipo, grado y clase de la erosión. Permite establecer la estabilidad del suelo y la susceptibilidad a los movimientos en masa. A mayor severidad mayor susceptibilidad a los movimientos en masa.

## 6. COBERTURA DE LA TIERRA

### 6.1 Definición

La cobertura de la tierra incluye la vegetación y las construcciones humanas que cubren la superficie de la Tierra (cuerpos de agua, herbazales, ciudades, entre otros). Gámez (1992) define la cobertura como un todo o una parte de algunos de los atributos de la tierra que, de cierta forma, ocupan una porción de su superficie ya que están localizados sobre esta.

### 6.2 Importancia del tema

Una idea sencilla y general de la razón de la cobertura de la tierra podría ser: Es un resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, los suelos, el clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo. Dicha interrupción genera o contribuye a la aparición de diferentes procesos como afectación en la evolución de las especies, deterioro de ecosistemas, cambios en el patrón de ciclos hidrológicos, cambios en las formas del relieve (en gran número de casos en forma negativa produciendo deslizamientos, flujos, avalanchas, erosión).

La visión enunciada configura la relación e interdependencia de los recursos evaluados (incluyendo la cobertura y uso del suelo) para estimar una susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en cuya expresión se manifieste el efecto del hombre. Una evidencia permanente, tangible y evaluable es la ocurrencia de movimientos en masa donde la cobertura de la tierra siempre ha estado implicada.

La importancia de evaluar la cobertura de la tierra dentro de la generación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos es proporcionar una idea más clara de la incidencia e importancia de esta temática, visto no solamente como la “vegetación” que se encuentra en determinado sitio, sino todo lo que implica la cobertura, como, la humedad del suelo, la relación de la humedad con la precipitación y el tipo de paisaje en el que se desarrolla, entre otras.

El tipo, la densidad, la capacidad de interceptación de agua lluvia y el área de protección de cobertura vegetal constituye un factor de resistencia o favorecimiento de procesos morfodinámicos como la erosión y los movimientos en masa. En áreas de alta pendiente y de coberturas vegetales de ciclos biológicos muy lentos y frágiles, toda intervención de estas, hace que se aumente la susceptibilidad.



### 6.3 Forma de obtención

Se cuenta con la capa nacional de coberturas de la tierra línea base (2000-2002) escala 1:100.000, (IDEAM, IGAC, SINCHI, IAVH, UAESPNN y CORMAGDALENA), adaptación de la Metodología CORINE Land Cover a partir de la interpretación visual de imágenes de satélite, fotografías aéreas y trabajo de verificación en campo. Esta capa se distribuye libremente a las entidades del SINA junto con la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra (IDEAM, 2010).

#### 6.3.1 Coeficiente de Cobertura (Kc)

Con el fin de conocer de manera aproximada la cantidad de agua que las coberturas extraen del suelo, se toman datos principalmente de la FAO y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presentan los Kc que se sugiere emplear como una variable derivada de la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia en condición estándar, indicando que entre mayor sea el Kc mayor será la magnitud de la evapotranspiración, lo cual puede favorecer la condición de estabilidad de los terrenos en la medida que sale mayor cantidad de humedad de los suelos y de la cobertura disminuyendo los efectos de saturación de los suelos.

Obtenido el Kc para cada cobertura este se multiplica por la relación precipitación media/ETP potencial cuando esta última fuera menor a 1 según el tipo de clima en el que se encuentre la cobertura.

Tabla 5. Coeficiente de cobertura para diferentes coberturas vegetales<sup>6</sup>

Categoría	Código	Clases de cobertura de la tierra	kc
Cobertura mayormente transformada	11	Áreas urbanas	0.2
	12	Áreas mayormente alteradas	1
Cobertura de agroecosistemas	21	Cultivos anuales o transitorios	0.9-1.15
	22	Cultivos semipermanentes y permanentes	1-1.25
	23	Pastos	1
	24	Áreas agrícolas heterogéneas	1
	25	Áreas agroforestales	0.8-1.1
	26	Bosques plantados	0.6-1.0
Coberturas mayormente naturales	31	Bosques naturales	0.6
	32	Vegetación secundaria	0.6-0.9
	33	Arbustales	0.3-1.1
	34	Herbazales	0.3-1.1
	35	Zonas desnudas, sin o con poca vegetación	1
	36	Afloramientos rocosos	1
	37	Glaciares y nieves	0.2
Cobertura de áreas húmedas continentales y costeras	41	Hidrofitia continental	1.2
	42	Herbáceas y arbustivas costeras	1.2
Superficies de agua	51	Aguas continentales naturales	1.05
	52	Aguas continentales artificiales	1.05
	53	Aguas marinas	1.05
	54	Lagunas costeras	1.05
Sin información	61	Nubes	-
	62	Sombra de nubes	-

<sup>6</sup> Estos valores fueron tomados de la Serie Riego y Drenaje de la FAO No 56. Evapotranspiración del cultivo. 2006  
Carrera 10 No. 20 - 30 Bogotá D.C. - PBX (571) 3527160 - Fax Server: 3527110 - 3527160 Ext: 2110 - 1911 - 1912 - 1913

### 6.3.2 Profundidad Radicular

Como se ha sugerido en estudios es necesario tener en cuenta la profundidad radicular y el refuerzo que ejerce la vegetación con relación a la estabilidad cuando se evalúa el esfuerzo cortante en una superficie de falla. Se deben tomar datos de profundidad radicular para diferentes coberturas vegetales consignados en algunos estudios entre ellos los de la FAO y otros, adicionalmente, es importante el incremento del factor de seguridad para coberturas boscosas con el propósito de hacer una distinción y mostrar la bondad de esas coberturas en la estabilidad de los terrenos.

## 7. CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Se calcula mediante la suma ponderada de cada una de las variables para obtener un índice por tema.

En la figura 15, se presenta a manera de ejemplo, el cálculo de la susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa a escala 1:500.000. (IDEAM 2009)

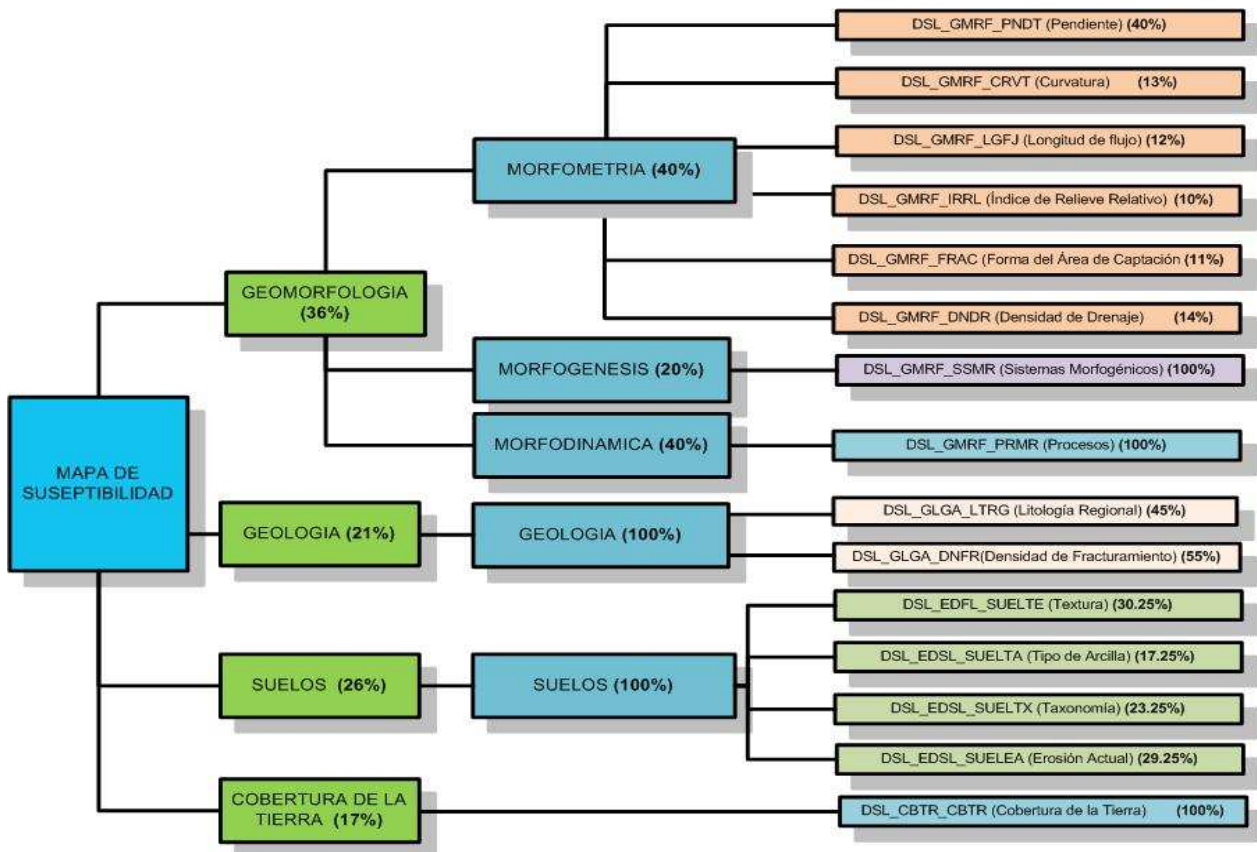


Figura 15. Cálculo de la susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos.

## 8. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Como resultado se obtendrá una zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa, los cuales se agruparán en cinco clases, utilizando la nomenclatura del semáforo, como se presenta en la figura 16.

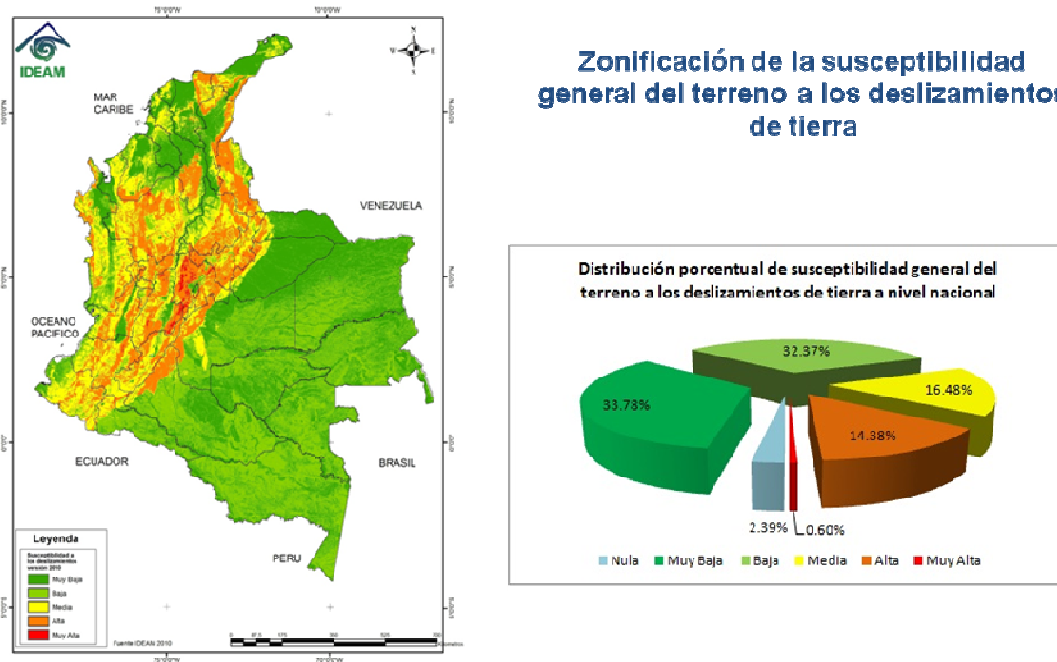


Figura 16. Zonificación de la susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa.

## 9. USOS Y APLICACIONES DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

La zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa, proporciona una información indicativa de inestabilidad o propensión del terreno de acuerdo a sus condiciones intrínsecas y la amenaza solamente se consolida cuando actúa un detonante o desencadenante que alcanza umbrales o límites críticos.

Con lo anterior la amenaza por movimientos en masa se propone considerarla dinámica en el tiempo y en el espacio, de acuerdo con la definición:

La zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa, se puede utilizar en:

- Base para la zonificación ambiental en los diferentes procesos de ordenamiento del territorio.
- Insumo básico para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos de tierra para alertas tempranas de origen hidrometeorológico.
- Insumo base para el desarrollo del Mapa de amenaza relativa por movimientos en masa.
- Insumo base para priorizar la implementación de estudios puntuales de amenaza relativa y riesgo por movimientos en masa.

## 10. EQUIPO TÉCNICO

Dirección técnica: Dra Luz Marina Arévalo Sánchez.

Grupo de Suelos y tierras del IDEAM: Agrólogo Reinaldo Sánchez, Geólogo Néstor Martínez, Ingeniero Julián Corrales, Ingeniero Jorge Luis Ceballos, Geólogo Vicente Peña, Geólogo Rodolfo Franco.

Ingeominas: Dra. Martha Lucia Calvache, Ingeniera Gloria Ruiz y Grupo de profesionales de Geoamenazas.

Oficina de Informática del IDEAM: Ingeniero Jorge Fernando Bejarano, Ingeniera Liseth Rodríguez, Ingeniero Rubén Mateus y grupo de profesionales.

IGAC: Dr. Julián Serna, Dr. Ricardo Siachoque, Dr. Jorge Alberto Sánchez y Dr. Carlos Pulido.

Consultores: Geocing Ltda, Geospatial, Epam S.A. y Datum Ingeniería y grupo de profesionales.