



**AJUSTE DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO  
LEÓN SZH (1201) LOCALIZADA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA EN  
JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO  
SOSTENIBLE DEL URABÁ (CORPOURABA)**

**FASE DIAGNÓSTICO  
CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE RIESGO**

MARZO DE 2019

## CONTENIDO

2	IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FENÓMENOS AMENAZANTES Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA.....	5
2.1	MOVIMIENTOS EN MASA (MM) .....	5
2.1.1	Descripción metodológica para obtener susceptibilidad a movimientos en masa	5
2.1.2	Descripción de las variables de susceptibilidad a movimientos en masa .....	6
2.1.3	Análisis de la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa ....	41
2.1.4	Descripción metodológica para obtener amenaza por movimientos en masa	50
2.1.5	Descripción de las variables de amenaza por movimientos en masa .....	57
2.1.6	Validación en campo de la condición de amenaza por movimientos en masa	71
2.1.7	Análisis de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa .....	73
3	BIBLIOGRAFÍA.....	75

## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Calificación y categorización de curvatura del terreno.....	14
Tabla 2. Calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al perfil.....	16
Tabla 3. Calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al plano horizontal.....	17
Tabla 4. Calificación y categorización de la orientación de la ladera.....	19
Tabla 5. Calificación y categorización de la distancia a cuerpos de agua .....	25
Tabla 6. Calificación y categorización de la distancia a vías .....	26
Tabla 7. Calificación y categorización de la distancia a fallas y lineamientos.....	28
Tabla 8. Calificación y categorización de la distancia a canteras. ....	31
Tabla 9. Calificación y categorización según origen o del tipo de unidad geológica	33
Tabla 10. Calificación y categorización según el tipo de subunidad geomorfológica. ....	35
Tabla 11. Calificación y categorización según el tipo de cobertura vegetal. ....	37
Tabla 12. Calificación y categorización según el tipo de unidad geológica superficial. ....	39
Tabla 13. Prueba Kolmogorov – Sminorv.....	45
Tabla 14. Matriz de correlación.....	46
Tabla 15. Prueba ANOVA.....	47
Tabla 16. Escenarios de factor de seguridad evaluados para la cuenca hidrográfica.....	54
Tabla 17. Posibilidades de falla agrupadas por escenario .....	54
Tabla 18. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases .....	57
Tabla 19. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases .....	57
Tabla 20. Parámetros geomecánicos evaluados por cada zona geotécnica .....	67

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Estructura metodológica para la evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa.....	6
Figura 2. Selección de la muestra de eventos estables .....	8
Figura 3. Modelo digital de elevación (DEM).....	9
Figura 4. Factores condicionantes derivados de las características geométricas de la ladera .....	10
Figura 5. Propensividad a inestabilidad por pendiente pendiente de ladera.....	11
Figura 6. Propensividad a inestabilidad por pendiente senoidal de ladera .....	12
Figura 7. Propensividad a inestabilidad por rugosidad del terreno .....	13
Figura 8. Propensividad a inestabilidad por curvatura del terreno.....	15
Figura 9. Propensividad a inestabilidad por curvatura del terreno con respecto al perfil .....	16
Figura 10. Propensividad a inestabilidad por curvatura del terreno con respecto al plano horizontal .....	17
Figura 11. Propensividad a inestabilidad por insolación.....	18
Figura 12. Propensividad a inestabilidad por orientación de la ladera.....	20
Figura 13. Propensividad a inestabilidad por acumulación de la cuenca.....	21
Figura 14. Longitud de cuenca acumulada .....	22
Figura 15. Factores condicionantes derivados de las variables con relación de proximidad.....	24
Figura 16. Propensividad a inestabilidad por proximidad de la distancia a drenajes.....	25
Figura 17. Propensividad a inestabilidad por proximidad de la de la distancia a una vía.....	27
Figura 18. Densidad de fracturamiento y distancia a fallas .....	29
Figura 19. Propensividad a inestabilidad por proximidad de la de la distancia a canteras.....	31
Figura 20. Factores condicionantes derivados de las variables categóricas .....	32
Figura 21. Propensividad a inestabilidad según origen o del tipo de unidad geológica .....	34
Figura 22. Propensividad a inestabilidad según el tipo de subunidad geomorfológica. ....	36
Figura 23. Propensividad a inestabilidad según el tipo de Cobertura (CORINE LAND COVER).....	38
Figura 24. Propensividad a inestabilidad según el tipo de unidad geológica superficial UGS.....	40
Figura 25. Histogramas de distribución de los factores de propensividad .....	42
Figura 26. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa .....	50
Figura 27. Estructura metodológica para la evaluación de amenaza por movimientos en masa.....	51
Figura 28. Esquema del modelo de talud infinito.....	53
Figura 29. Número de curva .....	59
Figura 30. Retención Potencial .....	60
Figura 31. Altura de la lámina de agua para período de retorno $t=2yr$ .....	61
Figura 32. Altura de la lámina de agua para período de retorno $t=5yr$ .....	62
Figura 33. Altura de la lámina de agua para período de retorno $t=20yr$ .....	63
Figura 34. Altura de la lámina de agua para período de retorno $t=50yr$ .....	64

Figura 35. Altura de la lámina de agua para período de retorno $t=100yr$ .....	65
Figura 36. Coeficiente de aceleración sísmica.....	66
Figura 37. Modelo Geológico -Geotécnico.....	68
Figura 38. Cohesión.....	69
Figura 39. Ángulo de Fricción.....	70
Figura 40. Peso unitario.....	71
Figura 41. Validación en campo de la condición de amenaza por movimientos en masa.....	72
Figura 42. Validación en campo de la condición de amenaza por movimientos en masa en zonas sin acceso.....	73
Figura 43. Amenaza por movimientos en masa.....	75

EN ETAPA DE PUBLICACIÓN

## 2 IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FENÓMENOS AMENAZANTES Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

### 2.1 MOVIMIENTOS EN MASA (MM)

Un movimiento en masa es el proceso por medio del cual un volumen de material constituido por roca, suelo, escombros o una combinación de cualquiera de estos, se desplaza por una ladera o talud por acción de la gravedad. Suele ser conocido también como: fenómeno de remoción en masa, proceso de remoción en masa, derrumbe, deslizamiento, falla de talud, entre otros (Perico, 2016). Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve, su origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la corteza terrestre. Si por una parte el levantamiento tectónico forma montañas, la meteorización sumada a otros factores detonantes (sismo, lluvia, acción del hombre) actúa sobre las laderas para desestabilizarlas y cambiar el relieve a una condición de planicie (Portilla, 2012).

Para identificar y caracterizar los eventos amenazantes para este tipo de procesos se compilaron eventos de remoción en masa a partir de varias fuentes, dentro de las que se incluyen la información de campo, eventos históricos y de información secundaria tomados de las bases de datos de CORPOURABÁ dentro de la cuenca hidrográfica del río León. El análisis de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa para la cuenca se realizó con base en la recopilación de la información necesaria para modelar cada fase de este estudio mediante observaciones de las diferentes variables identificadas.

#### 2.1.1 Descripción metodológica para obtener susceptibilidad a movimientos en masa

El primer paso en este proceso es la determinación de variables, para esto y de acuerdo al evento y a las características de las zonas de estudio, se estableció que las variables condicionantes son: pendiente de ladera, pendiente senoidal de la ladera, rugosidad, curvatura, curvatura longitudinal, curvatura transversal, orientación de la ladera, insolación, distancia a drenajes, distancia a vías, distancia a fallas y lineamientos, distancia a canteras, acumulación de cuenca, longitud de cuenca acumulada, pendiente media de cuenca vertiente, geología, unidades geológicas superficiales, geomorfología y uso del suelo o cobertura. Lo anterior debido a que las variables mencionadas favorecen la ocurrencia de movimientos en masa por las características descritas para cada una de ellas en el numeral 2.1.2 del presente escrito.

Posteriormente se lleva a cabo la categorización y calificación de cada una de las variables condicionantes de acuerdo con clasificaciones establecidas en metodologías oficiales, cuyos resultados se encuentran igualmente en la descripción de cada variable (Ver numeral 2.1.2).

**Figura 1. Estructura metodológica para la evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa**



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa se realizó una evaluación de factores de propensión dentro de un análisis multivariante discriminante para la asignación de coeficientes o pesos dentro de una función discriminante ajustada por una variable agrupación definida como sitios estables e inestables considerando la metodología planteada por Carrara (1991), Baeza (1996), Nuria (2001), Santacana (2003) y Cardona (2013).

A partir de lo anterior, sumado a la obtención del mapa de susceptibilidad para estos movimientos en masa en el área la cuenca hidrográfica, se procede a realizar el análisis de la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

## 2.1.2 Descripción de las variables de susceptibilidad a movimientos en masa

A continuación se describen las variables para la ponderación de los factores condicionantes:

### 2.1.2.1 Selección de la muestra de análisis (MM\_LM\_MOVT)

Está asociado con el inventario de movimientos en masa ubicados en la cuenca, y es la información base para la ponderación de variables que participan en el modelamiento de la susceptibilidad, como se ve representado en la Figura 2.

La muestra para sitios inestables surge de la combinación de información primaria y secundaria compuesta por el reconocimiento de procesos desarrollado con trabajo de campo, eventos inventariados por el SGC (2005) y de la combinación del análisis de fotointerpretación y elementos geomorfológicos asociados a procesos de inestabilidad para

un total de ciento setenta y ocho (178) procesos de inestabilidad que hacen parte de las zonas inestables dentro del análisis.

Todos estos se transformaron a tipo punto debido a que una proporción importante se cartografió tipo punto. Posteriormente se depuraron para que cada uno de los píxeles relacionados con inestabilidad sean completamente independientes. Al analizar la base de datos existente se procede a la depuración de las zonas inestables mediante el filtro y validación de la misma con los siguientes criterios:

- Pendiente de la ladera: eventos georreferenciados en zonas de pendientes inferiores a 12 grados o cercanos a la verticalidad.
- Zonas urbanas, de expansión: centros poblados y afectación antrópica del terreno: eventos que por su naturaleza obedecen a factores antrópicos y no tienen una relación intrínseca con la geometría ni la escala del estudio, razón por la cual se recomienda realizar estudios detallados en estas zonas que tengan en cuenta las modificaciones morfométricas detalladas.
- Eventos que no cuentan con un referente espacial puntual.

La muestra de análisis se puede obtener extrayendo un porcentaje de la población total elegida de manera aleatoria y que sea representativa de la población total. Una fórmula muy extendida que orienta sobre el cálculo del tamaño de la muestra para datos globales es la siguiente:

$$\text{Tamaño de la muestra (n)} = \frac{k^2 pqN}{e^2(N-1) + k^2 pq}$$

Donde:

**N:** es el tamaño de la población, esto es 178 procesos inestables.

**K:** es una constante que depende del nivel de confianza que asignemos que indica la probabilidad de que los resultados de la investigación sean ciertos. Típicamente se usa un nivel de confianza del 95% que corresponde con un valor de k igual a 1.96.

**e :** es el error deseado si se compara la población con la muestra. Se usa generalmente un error de 5%.

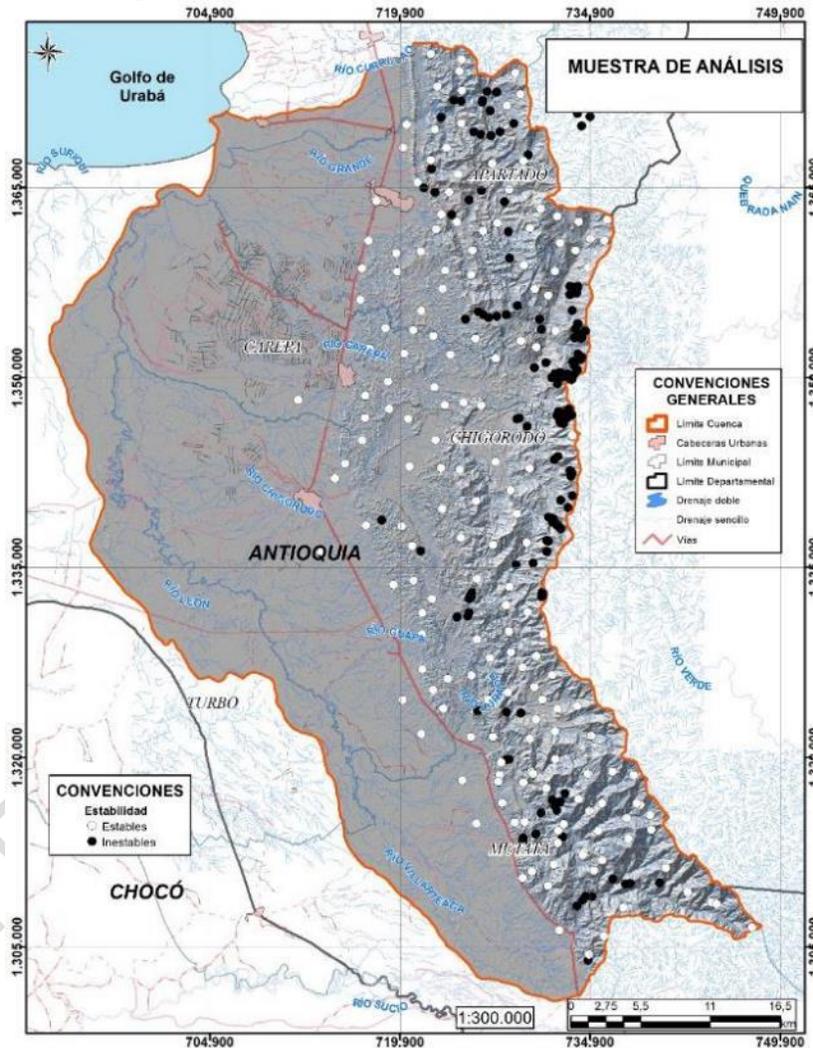
**p y q:** son proporciones de individuos que poseen la misma característica de estudio. Son valores desconocidos por lo cual se asumen con valor de 0.5.

Al calcular el tamaño de la muestra se obtiene un valor reducido de procesos inestables para análisis. Para este caso es definitivamente mejor usar toda la población y no una muestra pues, según Cardona (2013), es preferible obtener un modelo con mayor sensibilidad que clasifique correctamente la mayor cantidad de deslizamientos. Por otro lado, es preciso definir puntos estables y generar un factor de agrupación para aplicar el discriminante y debido a que el análisis discriminante trabaja bien cuando las poblaciones (celdas estables e inestables) tienen un tamaño similar en la muestra (Baeza, 1994), se definieron sitios estables que corresponden con ubicación aleatoria de celdas donde se asume que son áreas estables por no tener eventos históricos ni inventario de procesos por movimientos en masa.

Finalmente, la unión de zonas inestables (178 en total) y estables definidas (178 en total), al ser completamente independientes entre sí como celdas relacionadas se toma completa como muestra de análisis para no descartar casos importantes dentro del modelo. La muestra definitiva para el análisis (356 en total) se observa en la Figura 2.

- Formato: vector tipo punto.
- Fuente: base de datos de información de campo, eventos históricos de diversas bases de datos consultadas, procesos morfodinámicos, geología y geomorfología fotointerpretada.

Figura 2. Selección de la muestra de eventos estables

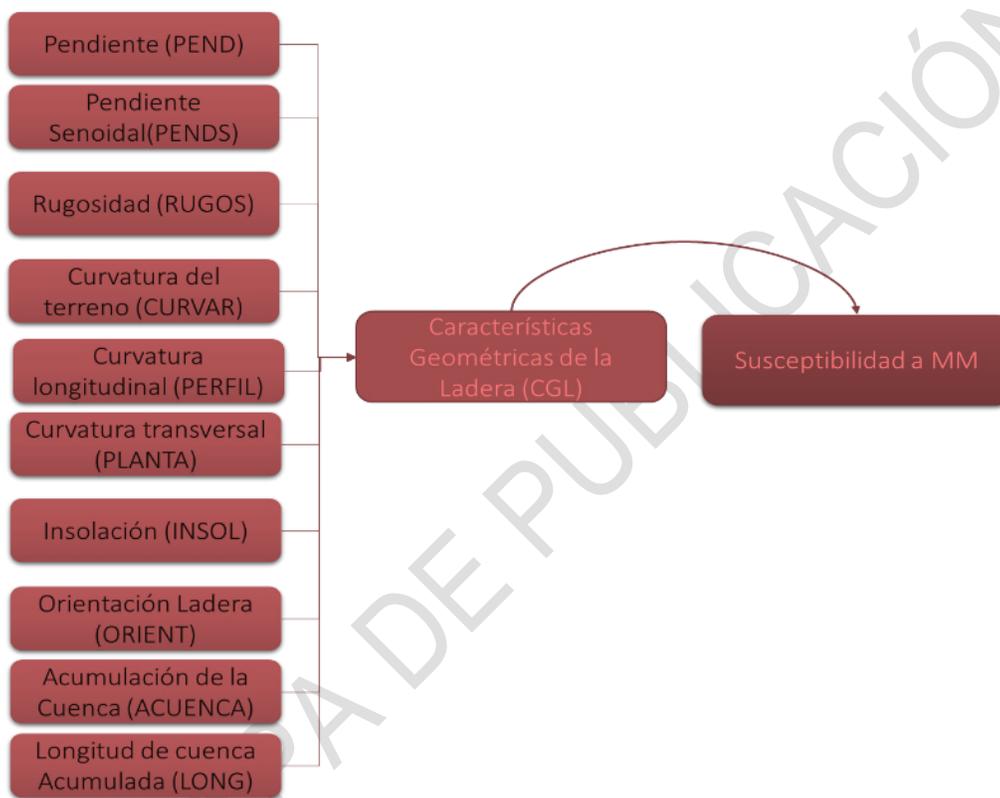


Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017



Las variables que constituyen las características geométricas de la ladera, también llamadas variables derivadas del DEM incluyen: pendiente de ladera, pendiente senoidal de ladera, rugosidad, curvatura del terreno, curvatura longitudinal, curvatura transversal, insolación, orientación ladera, acumulación de la cuenca y longitud de cuenca acumulada. Estos factores se encuentran representados en la Figura 4 y se definen a continuación.

**Figura 4. Factores condicionantes derivados de las características geométricas de la ladera**



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

#### a. Pendiente de la ladera (PEND)

Hace referencia al ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, su importancia radica en la influencia del factor sobre la estabilidad del suelo como factor geométrico.

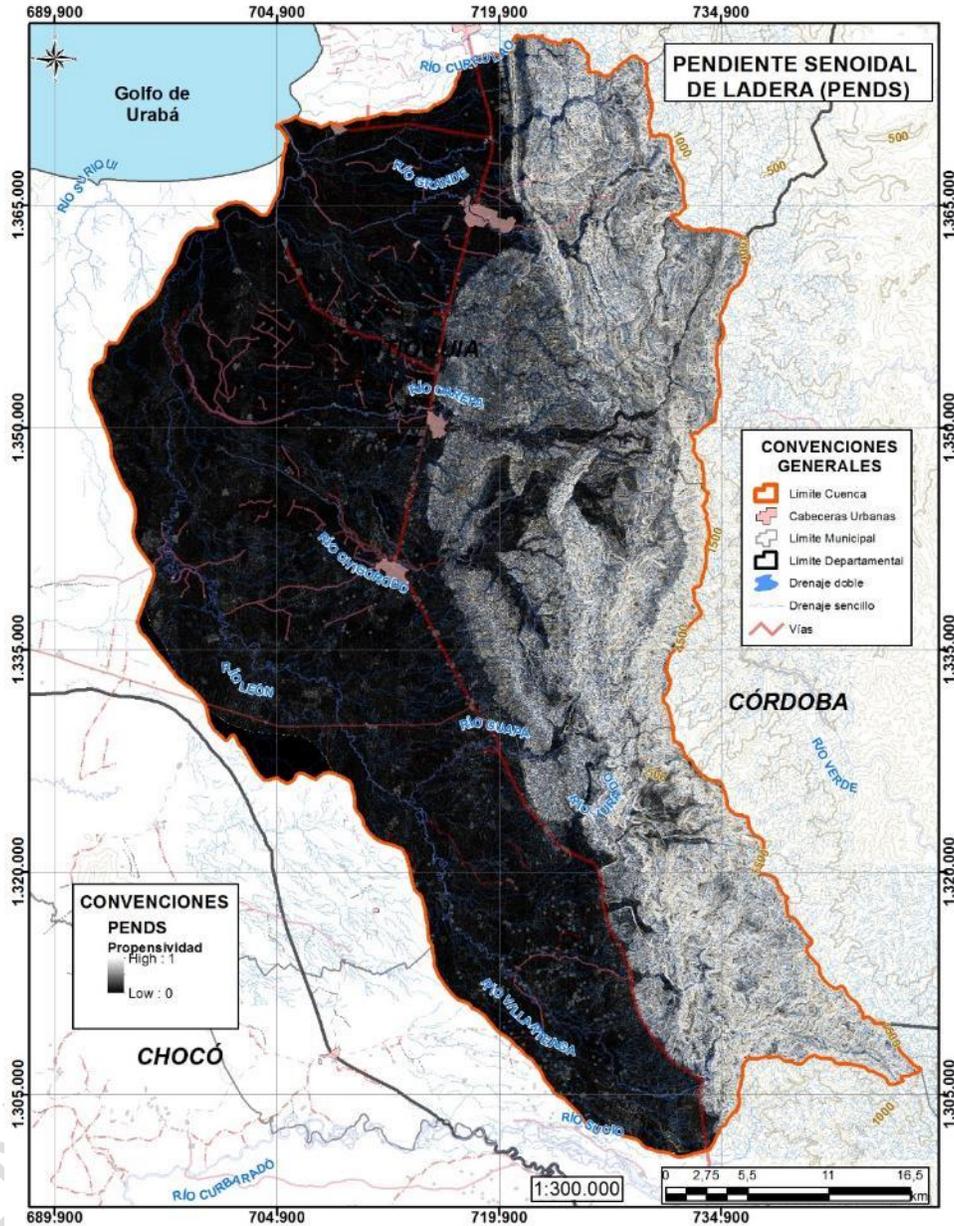
- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.

Para esta variable, se normalizaron sus valores entre 0 y 1, siendo 0 muy poco propenso y 1 muy propenso. Sin embargo, la variable se mantiene con valores graduales continuos y no se agrupa por rangos a pesar que típicamente se haga y se solicite en los alcances técnicos del presente estudio; esto porque esta agrupación es solamente aplicable en métodos heurísticos geomorfológicos y no para métodos heurísticos semicuantitativos,



del aumento de la pendiente es proporcional hasta los 45°, valor a partir del cual empieza a tener un comportamiento inversamente proporcional.

Figura 6. Propensividad a inestabilidad por pendiente senoidal de ladera



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.

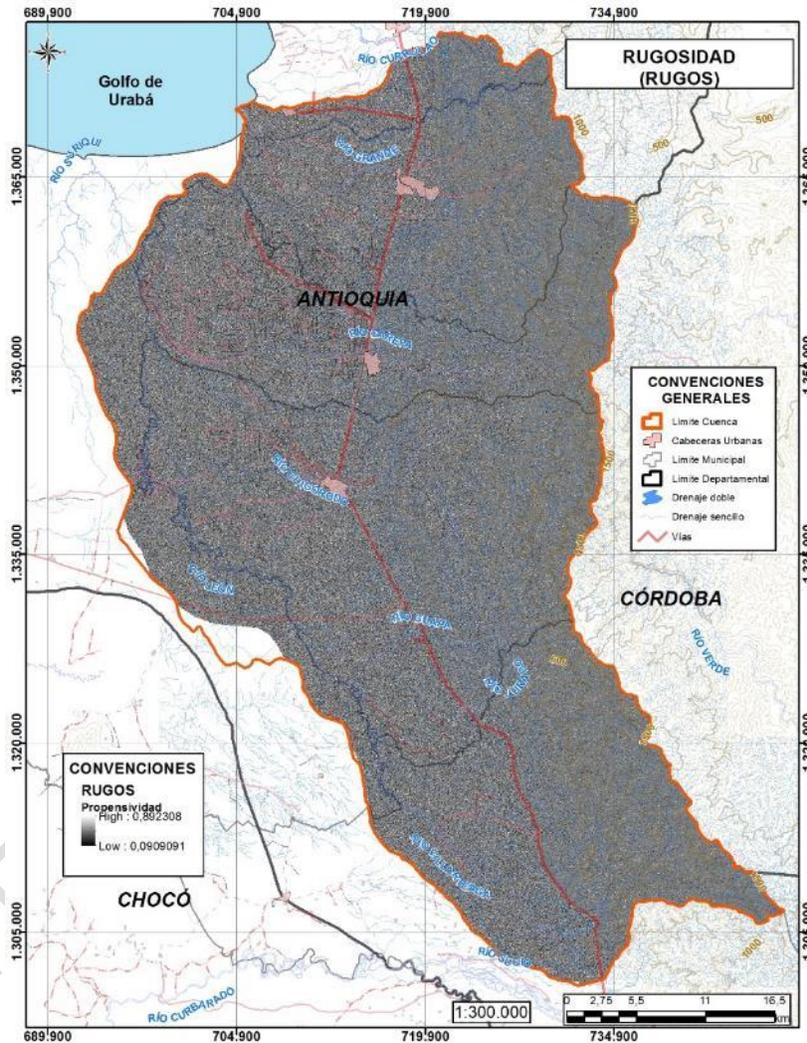
Debido a que los valores de pendiente senoidal de la Ladera varían de 0 a 1, donde 0 significa que el terreno es más estable y 1 cuando el terreno es más susceptible a sufrir un

evento de movimiento en masa, la calificación para esta variable es equiparable con su valor.

**c. Rugosidad o variación de la pendiente del terreno (RUGOS)**

Corresponde a la desviación del vector normal a la superficie de cada celda permitiendo definir límites de taludes y laderas. Además, tiene un impacto en los deslizamientos pues a mayores cambios de pendiente aumenta su probabilidad.

**Figura 7. Propensividad a inestabilidad por rugosidad del terreno**



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.

Debido a que los valores de rugosidad varían de 0 a 1, donde 0 significa que el terreno no presenta variación alguna y 1 cuando el terreno presenta alta variación, la calificación para esta variable es equiparable con su valor.

#### d. Curvatura del terreno (CURVAR)

Corresponde al grado de curvatura de cada celda a evaluar con respecto al plano vertical. Su relación con el modelo está dada por el grado de concentración del drenaje superficial, el cual aumenta en las zonas con mayor concavidad. En la Tabla 1 se presenta la calificación y categorización de curvatura del terreno utilizada en el presente estudio.

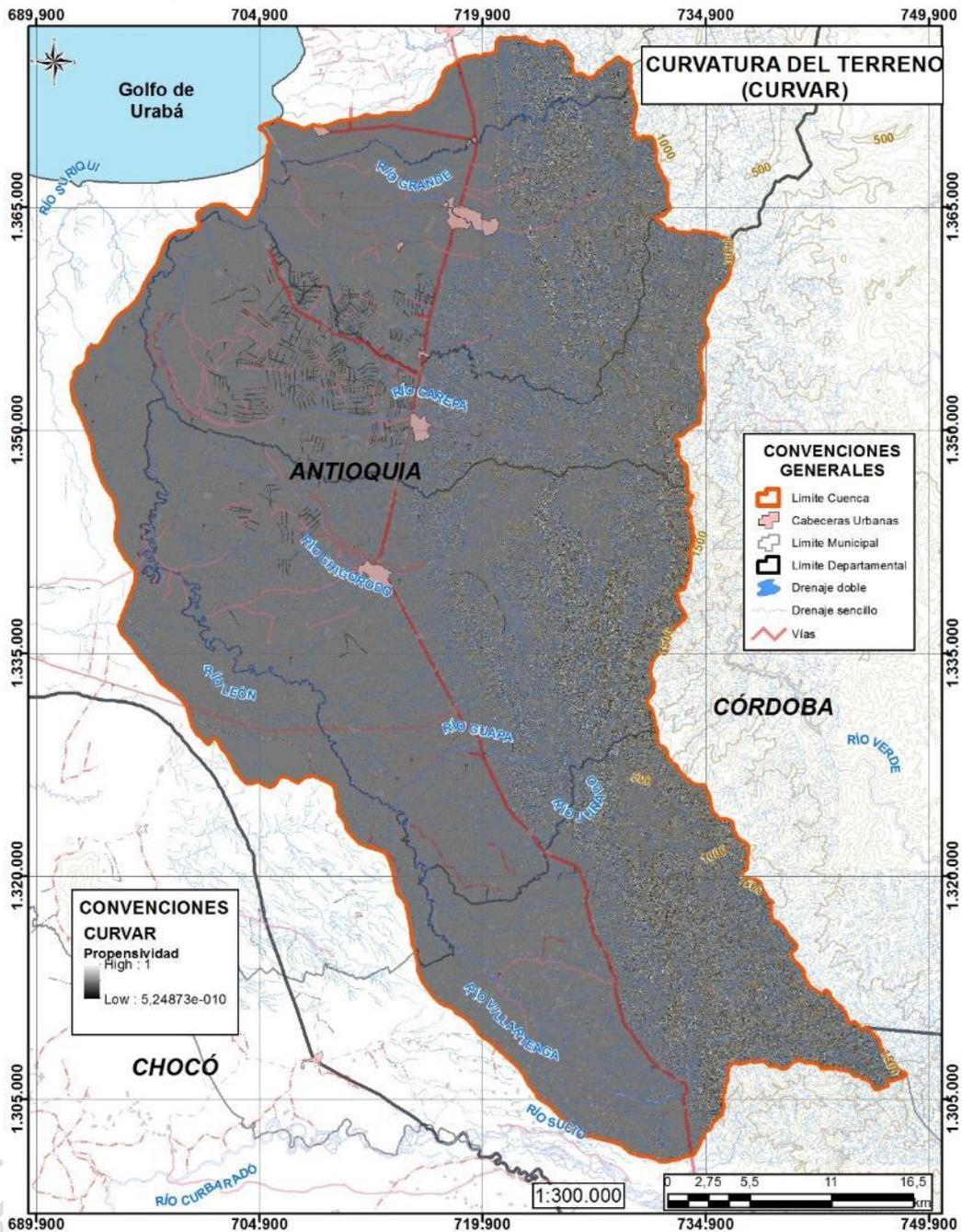
- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.

**Tabla 1. Calificación y categorización de curvatura del terreno**

CURVATURA	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
<-0,3	Alta	1
-0.3 – 0.3	Moderada	0,5
>0,3	Baja	0

Modificado: Nuria, 2001

Figura 8. Propensividad a inestabilidad por curvatura del terreno



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

**e. Curvatura con respecto al perfil (PERFIL)**

Hace referencia al grado de curvatura, pero a diferencia de la variable CURVAR, esta se mide de manera longitudinal y tiene una repercusión en la generación de erosión y deposición, debido a su impacto en la escorrentía y la aceleración del flujo. En la Tabla 2



Esta variable también está asociada con la curvatura del terreno, pero para este caso es medido en la dirección perpendicular de la pendiente. Indica la convergencia del flujo hacia la celda. En la Tabla 3 se presenta la calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al plano horizontal utilizada en el presente estudio.

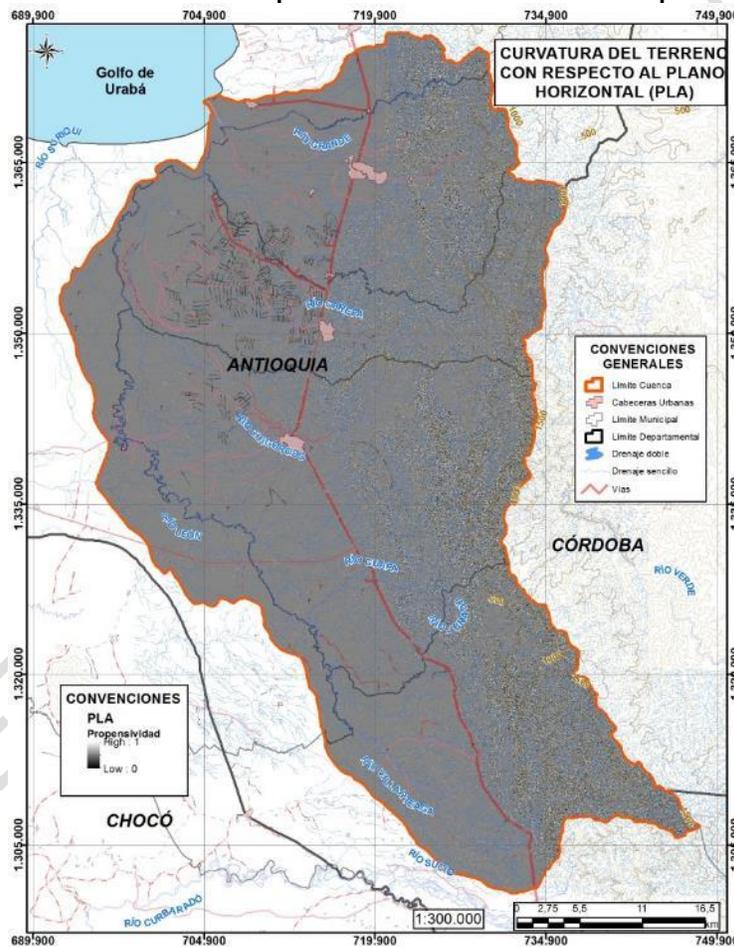
- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.

**Tabla 3. Calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al plano horizontal**

CURVATURA TRANSVERSAL	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
<-0,3	Alta	1
-0.3 – 0.3	Moderada	0,5
>0,3	Baja	0

Modificado: Nuria, 2001

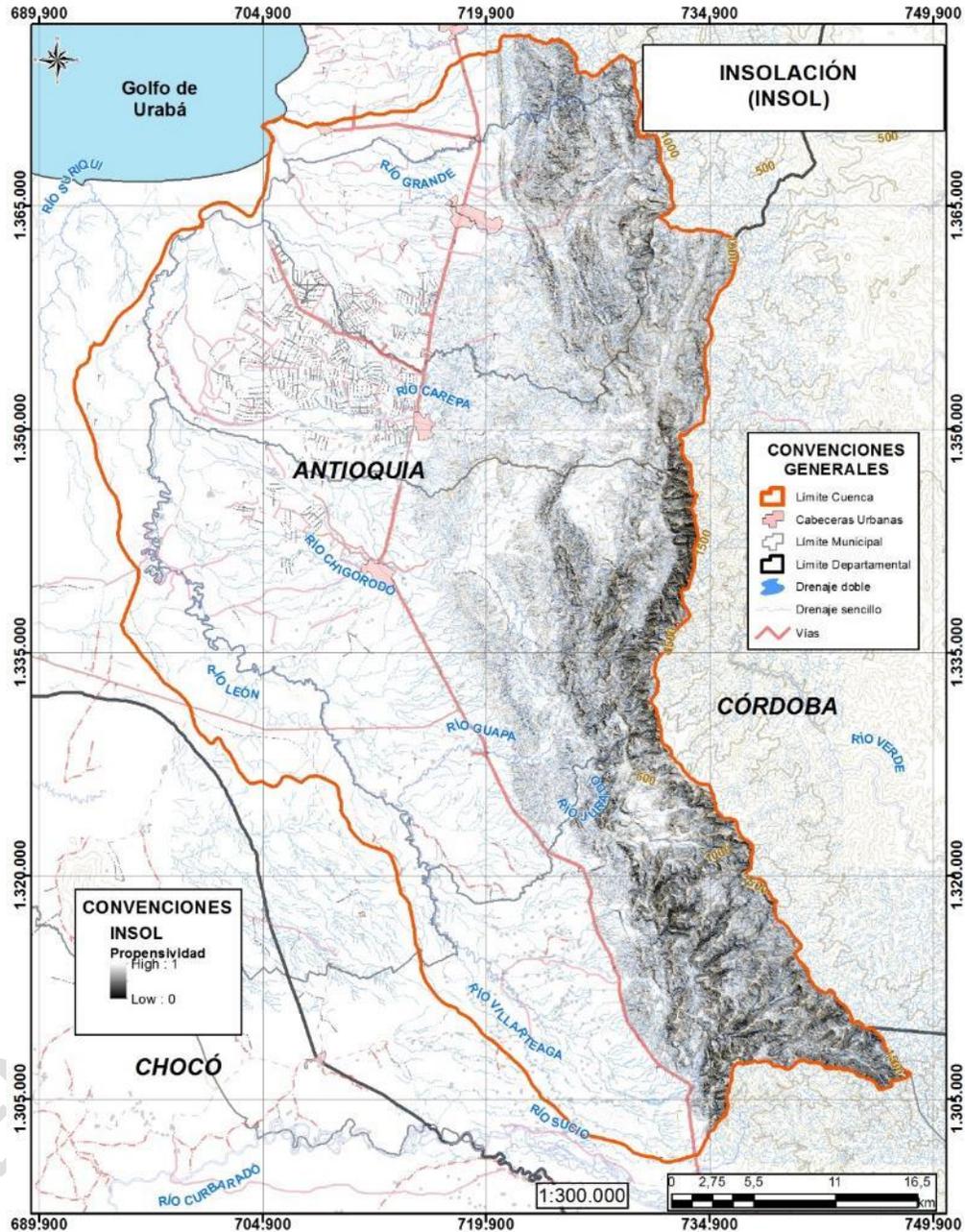
**Figura 10. Propensividad a inestabilidad por curvatura del terreno con respecto al plano horizontal**



### g. Insolación (INSOL)

Corresponde al coeficiente de iluminación o intensidad reflejada de la superficie terrestre, indicando el tiempo en que cada punto a evaluar dentro de la cuenca se encuentra en la sombra, lo que tiene incidencia en la humedad del suelo y a cambios bruscos.

Figura 11. Propensividad a inestabilidad por insolación



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.

Esta variable fue calculada con el promedio de 10 rásters que se generaron variando azimut y altitud de la siguiente manera: 5 rásters generados con azimut 315 y variación de altitud 18, 36, 54, 72, 90. Y 5 rásters generados con azimut 135 y variación de altitud 18, 36, 54, 72, 90.

Debido a que los valores de Insolación varían de 0 a 1, donde 0 significa que el terreno presenta menor retención de humedad y en consecuencia menor propensividad a eventos de movimientos en masa, la calificación para esta variable es equiparable con su valor.

#### **h. Orientación de la ladera (ORIENT)**

Hace referencia a la dirección de exposición de la ladera para cada punto de la cuenca a evaluar, y se adiciona con el fin de tener en cuenta tres elementos. Inicialmente es una forma de evaluar de manera indirecta la insolación (y por tanto su estado de humedad frecuente), también es un indicador para la cantidad de vegetación pues en las zonas sombrías se puede presentar vegetación con mayor estabilidad por la presencia de raíces en algunos casos y un tercer elemento está asociado con la cantidad de lluvia recibida “según la dirección de avance de los frentes nubosos”. En la Tabla 4 se presenta la calificación y categorización de la orientación de la ladera utilizada para realizar el análisis de la variable en el presente estudio.

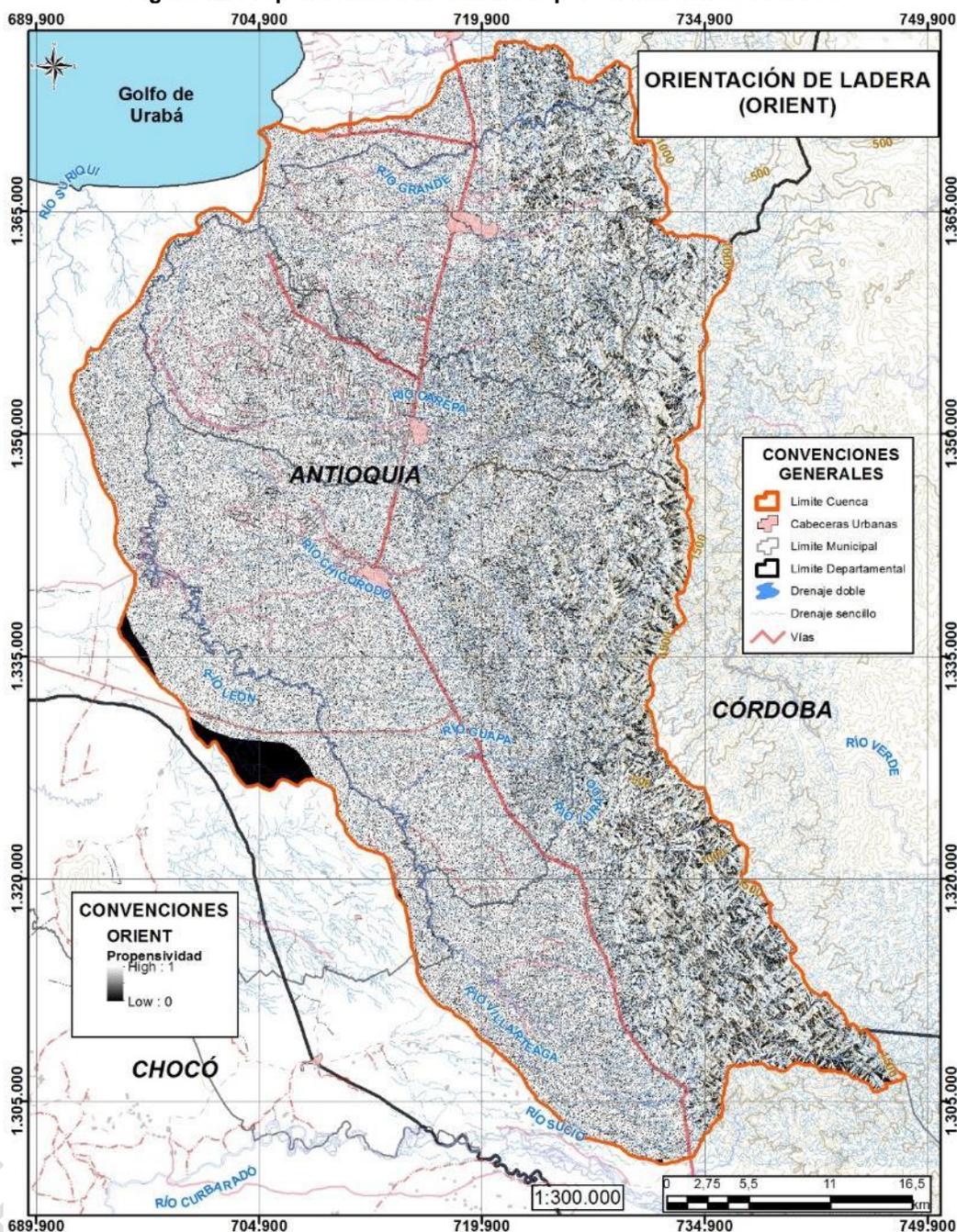
- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.

**Tabla 4. Calificación y categorización de la orientación de la ladera**

ORIENTACIÓN DE LADERA	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
-1	Baja	0
0 – 22.5	Alta	1
22.5 – 67.5	Moderada	0,66
67.5 – 112.5	Baja	0,33
112.5 – 157.5	Moderada	0,66
157.5 – 202.5	Alta	1
202.5 – 247.5	Moderada	0,66
247.5 – 292.5	Baja	0,33
292.5 – 337.5	Moderada	0,66
337.5 – 360	Alta	1

Fuente: Modificado: Nuria, 2001

Figura 12. Propensividad a inestabilidad por orientación de la ladera



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

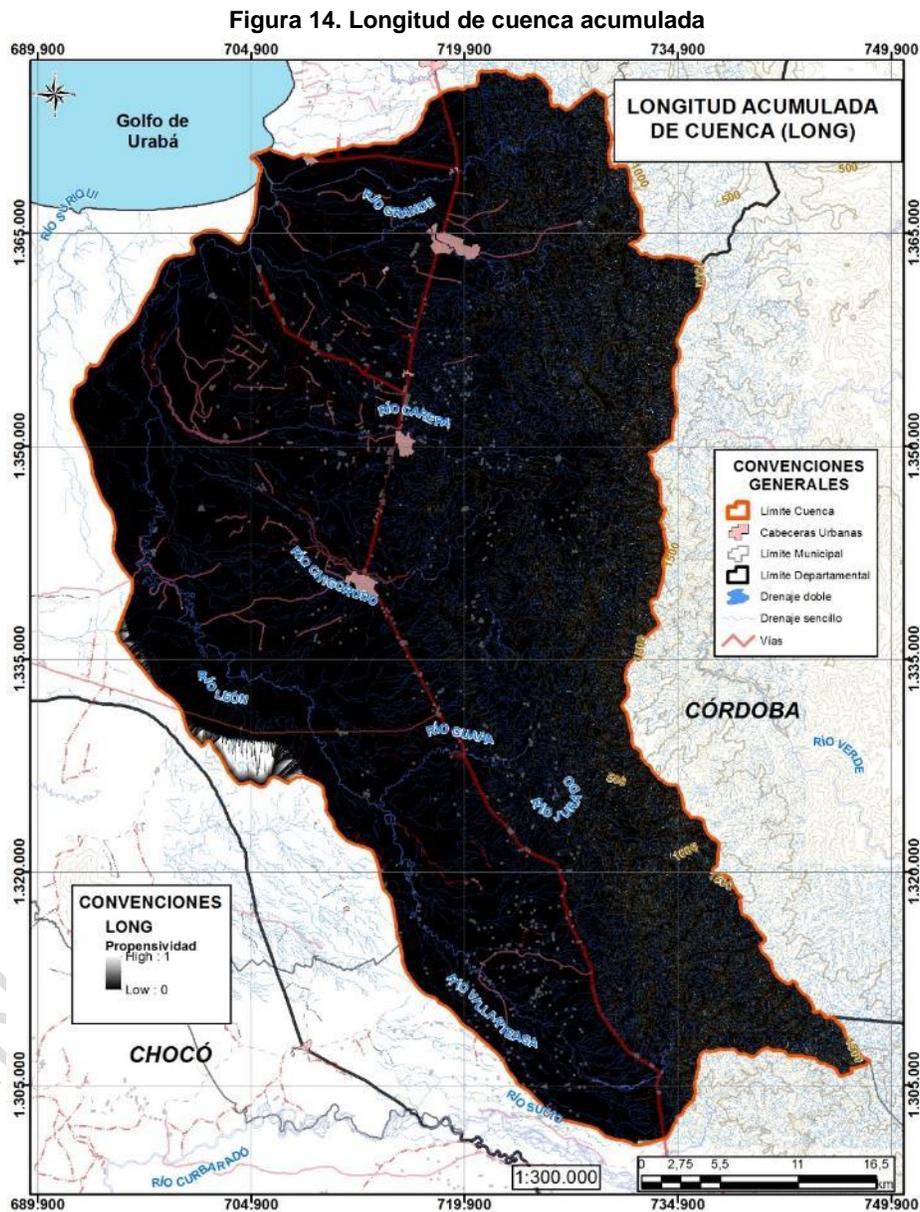
### i. Acumulación de la cuenca (ACUENCA)

La acumulación de la cuenca se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en el terreno. A mayor superficie más agua infiltrada y más posibilidades de producir roturas. Se obtiene a partir de la dirección del flujo, el cual permite posteriormente calcular la acumulación por cada celda del DEM.



Esta variable da una indicación del tamaño de la cuenca acumulada, la capacidad de la misma para concentrar agua subterránea y de la posible acumulación de sedimentos. Se obtiene a partir de la dirección de flujo que permite posteriormente calcular la longitud máxima de la cuenca acumulada para cada celda del DEM.

- Formato: ráster.
- Fuente: derivado del DEM.



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Para el área de estudio el modelo digital de elevación (DEM) permite ver que la zona comprende altitud entre -2 y 1835 m. aproximadamente que en su mayoría representan una topografía suave con dos tendencias principales: hacia la parte externa este de la cuenca alturas máximas y en el centro de la cuenca se observa el cambio progresivo de altura hacia

el río León en donde se evidencian las cotas mínimas de la cuenca. La zona en su mayoría presenta pendientes de bajo grado con excepción de los límites noroeste de la cuenca.

La rugosidad del terreno en general es muy baja, consecuente con la relación de pendientes (valores menores al 0,09) evidenciando que el cambio en altura presenta pendientes en general homogéneas, sin cambios abruptos de la pendiente en la cuenca. El valor normalizado más alto para la cuenca hidrográfica es de alrededor de 0,9, zonas de elevaciones moderadas, pero con algún grado de variabilidad en relación con la pendiente.

En la cuenca hidrográfica la topografía, la pendiente y la rugosidad del terreno permiten inferir una baja heterogeneidad del terreno y por lo tanto en general un alto grado de propensividad a procesos de remoción en masa en la parte media de la cuenca.

La pendiente senoidal de ladera (PENDS) presenta una distribución espacial muy similar a la pendiente de la cuenca, en general dos tendencias: valores normalizados altos (0,9) y susceptibilidad alta en la parte occidental de la zona y al oeste de la cuenca, en la zona urbana de los municipios hacia el río León, se presentan los menores valores de pendiente (0,06) y por lo tanto menor propensividad a eventos de remoción en masa.

La curvatura del terreno (CURVAR) para la cuenca hidrográfica presenta en general valores medios generalmente con calificaciones moderadas y bajas a mayor escala lo que implica una alta variabilidad del terreno entre zonas cóncavas, planas y convexas.

La tendencia en la curvatura del perfil (PERFIL) muestra que el terreno tiene principalmente curvaturas cóncavas que conforman zonas homogéneas (áreas de depósito) delimitadas por zonas elevadas donde se localizan las áreas con mayor susceptibilidad a procesos de denudación. La curvatura del plano (PLANTA) es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima, se relaciona con la convergencia y divergencia de la corriente por una superficie. En esta zona, la variable presenta valores de clasificación cercanos a 0,8 en toda la cuenca.

Observando los índices de insolación (INSOL) relacionados con los de la orientación de la pendiente (ORIENT) se observa una propensividad alta en la mayoría del terreno, hacia el sector sureste y centro de la cuenca, estas variables aumentan y por lo tanto la susceptibilidad a eventos por remoción en masa aumenta debido a la carencia de una cobertura vegetal que permita mayor estabilidad del terreno.

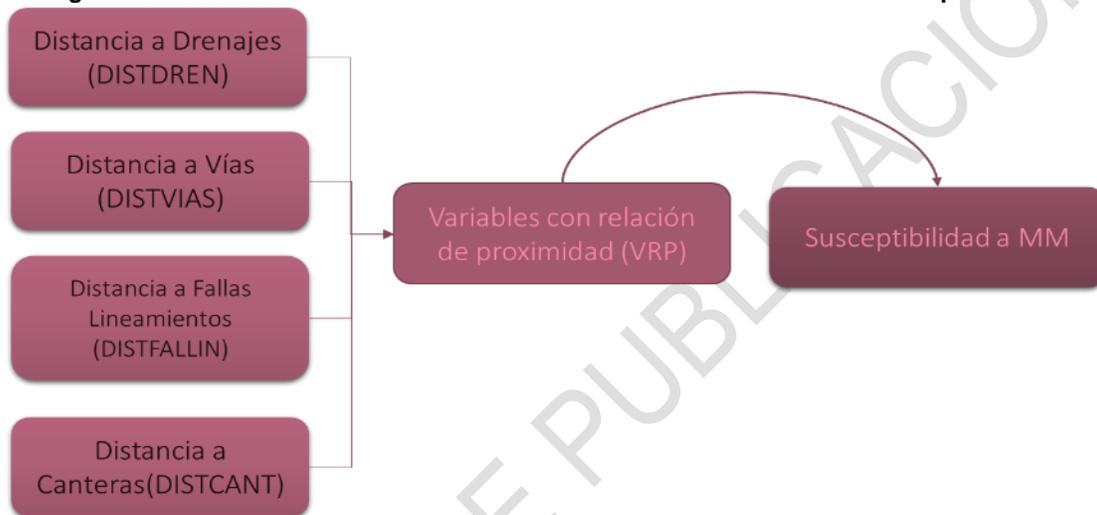
Se presenta una muy baja capacidad de almacenamiento de agua para la cuenca, los valores normalizados de acumulación de la cuenca (ACUENCA) tienden en su gran mayoría a cero. La propensividad de esta variable disminuye al no tener una alta acumulación de agua hacia los sectores más altos, su baja pendiente hace que sea estable y disminuya la probabilidad de presentarse movimientos en masa.

### **2.1.2.3 Variables con relación de proximidad (VRP)**

La relación de proximidad emplea el cálculo de la distancia de cada celda de análisis a los elementos sobre los cuales se considera una influencia en los procesos de inestabilidad geotécnica. Típicamente se define para cada punto inestable y estable la distancia directa a cada uno de los elementos analizados (p.e. vías, canteras, ríos) y se normaliza en función

de las máximas distancias encontradas. Este tipo de consideración hace perder sensibilidad al análisis pues distancias muy largas evidentemente no reflejan influencia del elemento de análisis sobre el proceso de inestabilidad que se esté consultando, por lo cual se define para este estudio una distancia límite de influencia estimada a partir de la relación que existe entre un punto inestable y la relación lineal de la variable de proximidad en su estabilidad. Este límite se define bajo criterios morfométricos y según los rasgos característicos de los puntos inestables observados para reducir drásticamente los valores extremos y aumentar significativamente la sensibilidad hacia este tipo de variables, las cuales se encuentran representadas en la Figura 15 y se definen a continuación.

**Figura 15. Factores condicionantes derivados de las variables con relación de proximidad**



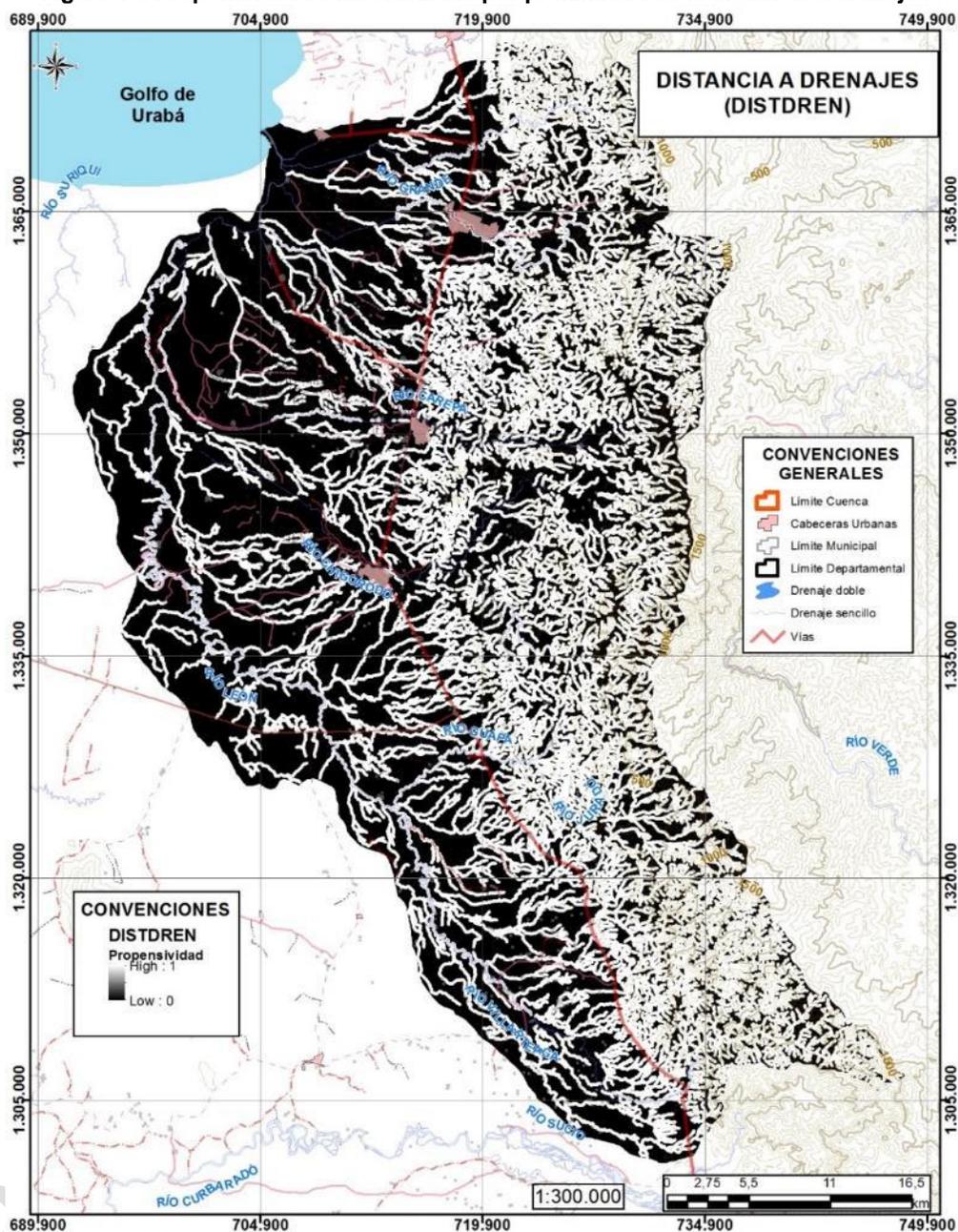
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

### 2.1.2.3.1 Densidad de drenaje y distancia a drenajes (DISTDREN)

Estas variables hacen referencia a la presencia del sistema de la red de drenaje, la cual se relaciona con el gradiente promedio y áreas de drenaje de las corrientes, cuya presencia favorece la ocurrencia de movimientos en masa por efecto de la socavación lateral en los márgenes laterales. Se puede definir espacialmente como densidad de drenaje o como influencia por proximidad, siendo la primera importante para el efecto del tiempo de concentración de caudales y generación de avenidas torrenciales y el segundo importante para considerar el efecto de socavación en la generación de deslizamientos en los márgenes de los cuerpos de agua. Para el presente análisis no se consideró la densidad de drenaje por ser mutuamente dependiente con la distancia a drenajes sin limitación de proximidad. En la Tabla 5 se presenta la calificación y categorización de la distancia a cuerpos de agua utilizada para el presente estudio.

- Formato vector tipo línea.
- Fuente: IGAC escala 25.000.

Figura 16. Propensividad a inestabilidad por proximidad de la distancia a drenajes



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Tabla 5. Calificación y categorización de la distancia a cuerpos de agua

DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA(m)	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
0 – 10	Alta	1
10 - 20	Alta	0,9
20 – 30	Alta	0,8
30 – 40	Alta	0,7
40 – 50	Moderada	0,6
50 – 60	Moderada	0,5

DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA(m)	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
60 – 70	Moderada	0,4
70 – 80	Baja	0,3
80– 90	Baja	0,2
100	Baja	0,1

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

### 2.1.2.3.2 Distancia a vías (DISTVIAS)

Corresponde a zonas en las que principalmente la acción antrópica ha dejado en evidencia taludes asociados a cortes viales en donde se pueden presentar condiciones de inestabilidad, el área es determinada mediante la obtención de la densidad vial de acuerdo con la influencia que esta presenta para cada pixel, adicionalmente se tiene en cuenta el tipo de vía, asignándole un peso de 10 a las de más alta categoría y disminuyendo una unidad por cada tipo. En la Tabla 6 se presenta la calificación y categorización de la distancia a vías utilizada en el presente estudio.

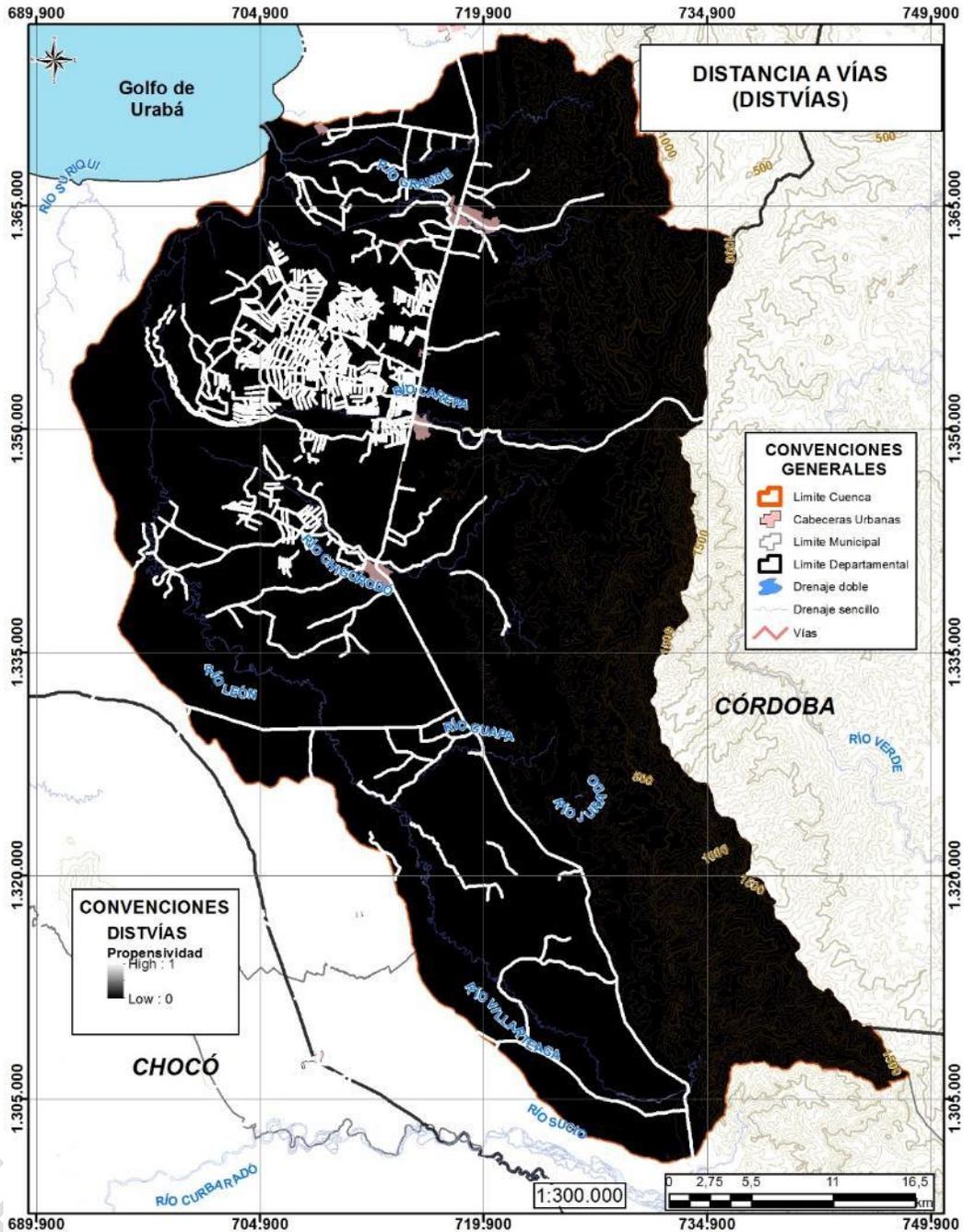
- Formato vector tipo línea.
- Fuente: IGAC escala 25.000.

**Tabla 6. Calificación y categorización de la distancia a vías**

DISTANCIA A VÍAS (m)	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
0 – 10	Alta	1
10 - 20	Alta	0,9
20 – 30	Alta	0,8
30 – 40	Alta	0,7
40 – 50	Moderada	0,6
50 – 60	Moderada	0,5
60 – 70	Moderada	0,4
70 – 80	Baja	0,3
80– 90	Baja	0,2
100	Baja	0,1

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 17. Propensividad a inestabilidad por proximidad de la de la distancia a una vía



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

### 2.1.2.3.3 Densidad de fracturamiento y distancia fallas y lineamientos (DISTFALLIN)

La densidad de fracturamiento depende fundamentalmente de la relación de proximidad a la falla o lineamiento según su método de obtención. Esta variable corresponde a las discontinuidades estructurales regionales de los macizos rocosos que disminuyen la resistencia de este, aumentando la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa.

En consecuencia, entre más proximidad exista entre la roca y la falla, menor será su capacidad de resistencia a los procesos denudaciones. Por lo anterior se realiza la siguiente clasificación y calificación, representado en la Tabla 7.

- Formato vector tipo línea.
- Fuente: SGC.

**Tabla 7. Calificación y categorización de la distancia a fallas y lineamientos**

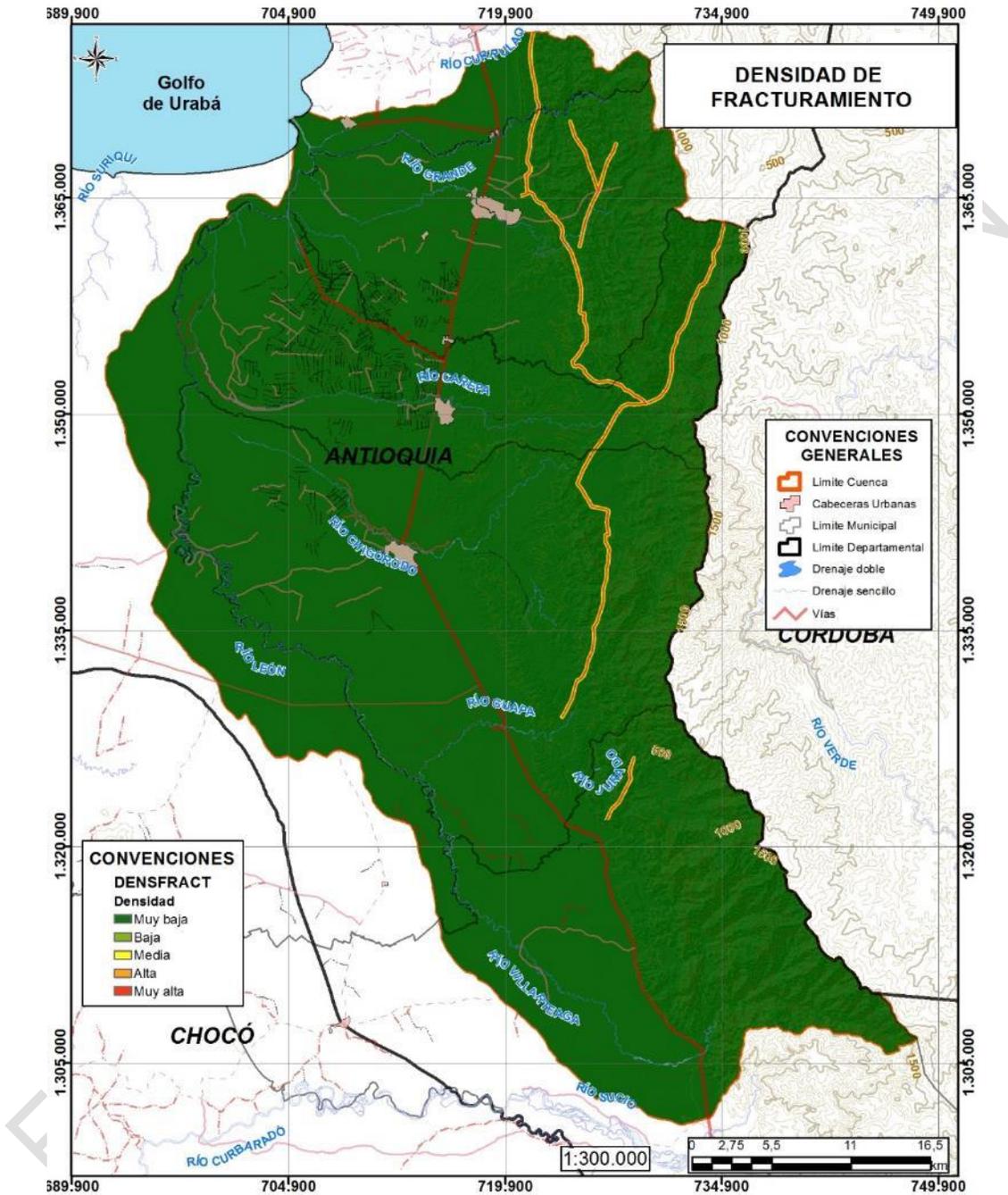
DISTANCIA FALLAS Y LINEAMIENTOS (m)	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
0 – 10	Alta	1
10 - 20	Alta	0,9
20 – 30	Alta	0,8
30 – 40	Alta	0,7
40 – 50	Moderada	0,6
50 – 60	Moderada	0,5
60 – 70	Moderada	0,4
70 – 80	Baja	0,3
80– 90	Baja	0,2
100	Baja	0,1

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

La presencia de fallas locales puede relacionarse con dos aspectos directos a la inestabilidad de laderas: sismicidad local como factor detonante y degradación de los materiales como factor condicionante. Al estar la cuenca cercana al sistema de fallas de Romeral se considera que la actividad de fallas locales se opaca considerablemente por la sismicidad regional, por lo cual no es conveniente relacionar movimientos en masa a los que se les desconoce su localización temporal detallada con la sismicidad local de fallas a las que no se les ha estudiado en detalle cuantitativo sus actividad. Por lo anterior, el análisis se enfocó en la posibilidad de degradación de las propiedades mecánicas de los materiales de roca y suelo en proximidad a las fallas.

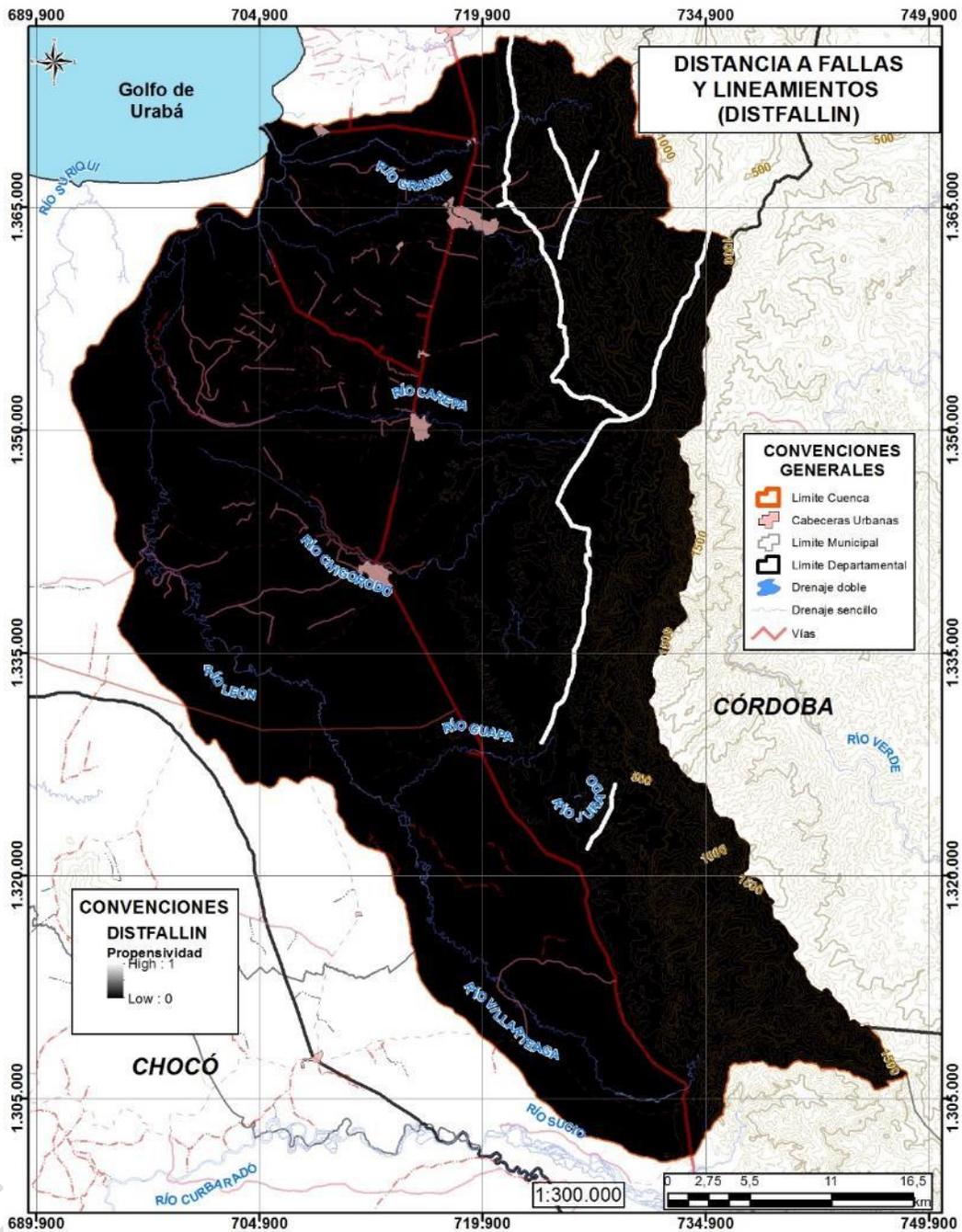
Figura 18. Densidad de fracturamiento y distancia a fallas

- (A) Densidad de fracturamiento



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

- (B) Distancia a fallasy lineamientos



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

#### 2.1.2.3.4 Distancia a canteras (DISTCANT)

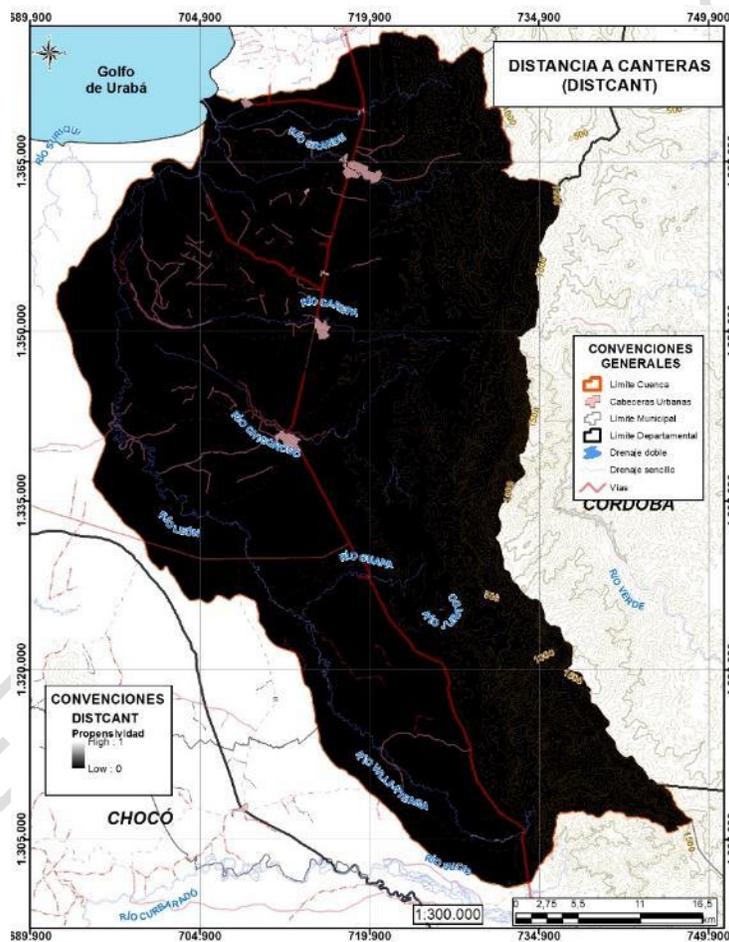
Esta variable hace referencia a la presencia intervención antrópica en la explotación de canteras, que por su ejecución genera desestabilidad del talud y aumenta la propensividad por movimientos en masa. En la Tabla 8 se presenta la calificación y categorización de la distancia a canteras utilizada para el presente estudio.

**Tabla 8. Calificación y categorización de la distancia a canteras.**

DISTANCIA A CANTERAS (m)	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
0 – 10	Alta	1
10 – 20	Alta	0,9
20 – 30	Alta	0,8
30 – 40	Alta	0,7
40 – 50	Moderada	0,6
50 – 60	Moderada	0,5
60 – 70	Moderada	0,4
70 – 80	Baja	0,3
80– 90	Baja	0,2
100	Baja	0,1

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

**Figura 19. Propensividad a inestabilidad por proximidad de la de la distancia a canteras**



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Dentro de los factores condicionantes que aumentan o disminuyen la susceptibilidad a movimientos en masa son las variables con relación de proximidad. Estas constituyen uno de los elementos determinantes en la ocurrencia de este tipo de eventos ya que entre menor distancia se tenga con uno de estos elementos condicionantes como drenajes, vías, fallas o canteras, se correlaciona un aumento en las pendientes, mayor erosión y dinámicas

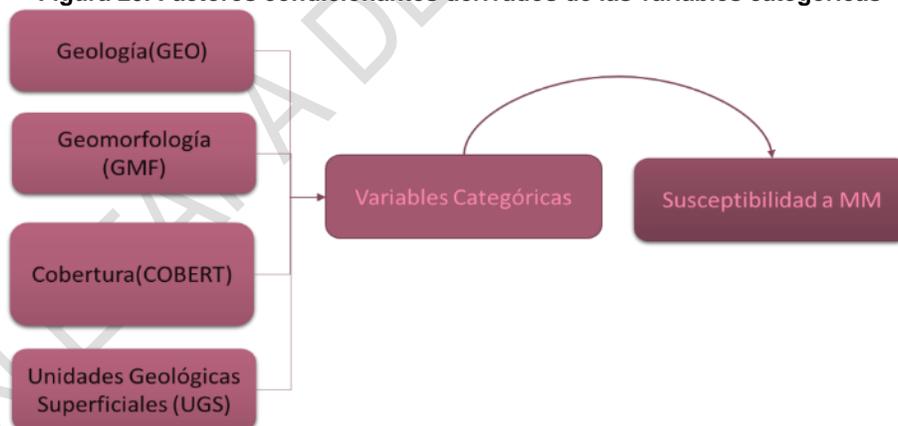
constantes que dan forma al relieve a través de procesos morfodinámicos como socavación lateral, erosión y movimientos en masa.

La distancia a vías y canteras es uno de los condicionantes más fuertes para aumentar o disminuir la susceptibilidad de una zona a eventos de movimientos en masa pues son factores antrópicos que propician la desestabilización de taludes por corte, remoción de material y ausencia de vegetación. A partir de esto se determinó un patrón de distribución espacial de zonas gradualmente más susceptibles que otras, condicionadas por la proximidad a las cabeceras municipales, donde es común encontrarse una densidad vial mayor, lo cual es observable primordialmente en el sector occidental de la cuenca. A su vez, el sector que presenta mayor propensividad a movimientos en masa por su proximidad a vías.

#### 2.1.2.4 Variables categóricas

La susceptibilidad a movimientos en masa depende también de variables categóricas como geología, geomorfología y coberturas de la tierra. La composición litológica de la roca se traduce en una mayor o menor competencia o resistencia de la misma, el ambiente de formación (estructural o denudacional) en que ésta se encuentre formando redonda en la influencia diferenciada de procesos de meteorización y la cobertura de la tierra sugiere degradación o conservación de los suelos superficiales y mayores o menores infiltraciones de agua. La combinación de estos factores aporta considerablemente a la ocurrencia de movimientos en masa, teniendo en cuenta siempre la variación del terreno, los ambientes morfogenéticos y el grado de humedad e infiltración en la zona que puede afectar la resistencia del material (ver Figura 20).

Figura 20. Factores condicionantes derivados de las variables categóricas



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

##### 2.1.2.4.1 Origen o Unidades geológicas básicas (GLG)

La variación de las características litológicas y estructurales del área de estudio influyen en el proceso de generación de movimientos en masa ya que llevan a diferencias en la resistencia y permeabilidad de las rocas y suelos. Típicamente se plantea como variable ORIGEN haciendo referencia al origen y composición litológica en la zona de estudio desde

el punto de vista del comportamiento mecánico de los materiales de superficie. Su planteamiento para un modelo de análisis discriminante en función de las unidades geológicas superficiales al tiempo con la definición del tipo de material denominado UGS en las variables, redundante en la creación de factores altamente correlacionados espacialmente. Para evitar esta dependencia entre variables y considerando que la variación de las características litológicas y estructurales del área de estudio influyen en el proceso de generación de movimientos en masa dadas las diferencias en la resistencia y permeabilidad de las unidades geológicas básicas, se define el origen de los materiales en función de la geología básica y se clasifican por propensión de manera normalizada (0 para baja a 1 para alta) como se muestra en la Figura 21. En la Tabla 9 se presenta la clasificación y los pesos asignados a cada una de las clases de acuerdo a sus características (calificación de la propensividad).

- **Formato:** Vector tipo polígono.
- **Fuente:** Unidades geológicas con fines de ordenación de cuencas – Consultor.

**Tabla 9. Calificación y categorización según origen o del tipo de unidad geológica**

Símbolo	Unidad Geológica Básica	Calificación
Etm	Batolito de Mandé	0,5
K2E1csce	Complejo Santa Cecilia-La Equis	0,6
K2pnu	Grupo Cañas Gordas - miembro Urrao	0,5
N1pi	Formación Floresant - Pavo Inferior	0,4
N2Q1coi	miembro Corpa Inferior	0,5
N2Q1com	miembro Corpa medio	0,6
N2Q1cos	miembro Corpa Superior	0,5
Q2lli	Llanura de inundación	0,2
Q2m	Depósitos intermareales	0,2
Qa	Depósitos de abanico reciente	0,3
Qaa	Depósitos de abanico antiguo	0,2
Qal	Depósitos aluviales recientes	0,3
Qas	Depósitos aluviales subrecientes	0,2
Qb	Depósitos barras	0,2
Qma	Depósitos de meandros abandonados	0,2
Qta	Depósitos de terraza reciente	0,3
Qtas	Depósitos de terraza subreciente	0,2

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017



En la Figura 22 se presenta la Calificación de la susceptibilidad del tipo de subunidad geomorfológica. En la Tabla 10 se presenta la clasificación y los pesos asignados a cada una de las clases de acuerdo a sus características (calificación de la propensividad).

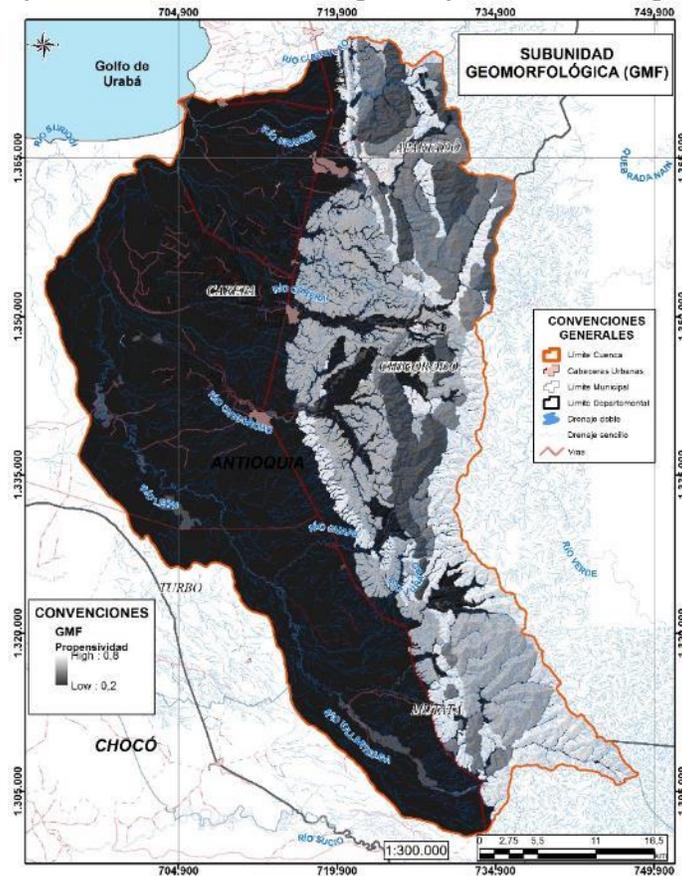
- **Formato:** vector tipo polígono.
- **Fuente:** unidades geomorfológicas según Carvajal - Consultor.

**Tabla 10. Calificación y categorización según el tipo de subunidad geomorfológica.**

Código	Subunidad	Calificación
Ase	Excavaciones	0,6
Dcred	Colina remanente disectada	0,5
Dcrem	Cerro remanente o relicto	0,5
Dld	Loma denudada	0,7
Dlde	Lomo denudado	0,7
Dldi	Lomeríos disectados	0,6
Dle	Ladera erosiva	0,7
Dlmd	Lomeríos muy disectados	0,7
Dlpd	Lomeríos poco disectados	0,6
Dsd	Sierra denudada	0,6
Faa	Abanico aluvial	0,3
Faaa	Abanico aluvial antiguo	0,2
Faas	Abanico aluvial sub-reciente	0,2
Fbc	Barra compuesta	0,4
Fbp	Barra puntual	0,4
Fca	Cauce aluvial	0,2
Fcdy	Cono de deyección	0,6
Fdc	Divagación de cauce activo	0,4
Fdd	Delta de desborde natural	0,4
Fea	Escarpe de abanico fluvial	0,4
Flg	Laguna	0,1
Fma	Meandro abandonado	0,2
Fpa	Plano anegadizo	0,1
Fpi	Plano o llanura de inundación	0,3
Fpla	Planicie y delta lacustrino	0,2
Fta	Terraza de acumulación	0,4
Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	0,5
Ftas	Terraza de acumulación subreciente	0,4
Mcpy	Complejo de crestas y artesas de playa	0,4
Sbh	Barra homoclinal	0,4
Sces	Colina estructural	0,5
Sclc	Ladera de contrapendiente de cuesta	0,4
Scle	Ladera estructural de cuesta	0,6
Se	Espinazo	0,5
Ses	Espolón	0,5
Sl	Lomos	0,5
Ss	Sierra	0,4
Ssan	Sierra anticlinal	0,4
Ssh	Sierra homoclinal	0,4
Sshlc	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	0,5
Sshle	Ladera estructural de sierra homoclinal	0,6

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 22. Propensividad a inestabilidad según el tipo de subunidad geomorfológica.



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

### 2.1.2.4.3 Vegetación y tipo de cobertura (COBERT)

El tipo de cobertura vegetal y el uso del suelo influyen en la estabilidad del terreno mediante mecanismos hidrológicos que influyen en la capacidad de infiltración en el suelo y la humedad del mismo, y mediante mecanismos mecánicos que generan el aumento de resistencia por la presencia de raíces y la protección frente a la erosión. La vegetación puede influir de manera beneficiosa o adversa en la estabilidad de las laderas, dependiendo de cómo actúen dichos mecanismos. Un ejemplo de ello es la presencia de raíces que aumentan la resistencia del suelo, al mismo tiempo que favorecen una mayor infiltración del agua de lluvia.

El área urbanizada produce impermeabilidad en el terreno, beneficiando la estabilidad si se cuenta con una correcta canalización y disposición de aguas lluvias y negras, aunque también se aporta peso adicional a la ladera. Las áreas verdes, cultivos, al igual que los patios en tierra, actúan como esponjas, absorbiendo la precipitación e infiltrando agua a la ladera, situación desfavorable frente a la saturación del suelo, el cual es un factor desencadenante de deslizamientos. La Figura 23 muestra el peso asignado a cada tipo de cobertura de acuerdo a su influencia en la susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

En la Tabla 11 se presenta la clasificación y los pesos asignados a cada una de las clases de acuerdo a sus características (calificación de la propensividad).

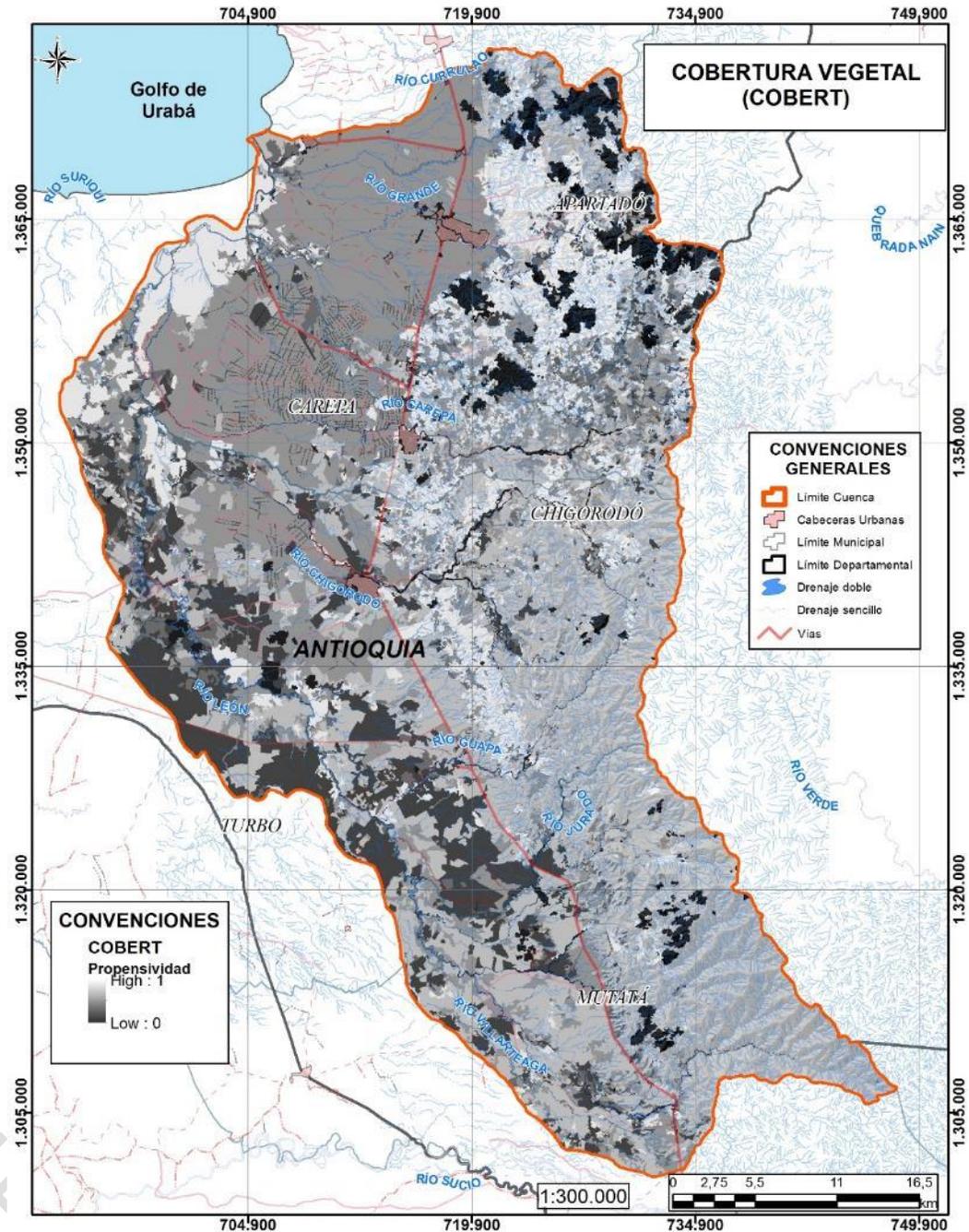
- **Formato:** Vector tipo polígono.
- **Fuente:** Cobertura CORINE LAND COVER - Consultor.

**Tabla 11. Calificación y categorización según el tipo de cobertura vegetal.**

Código	Coberturas	Calificación
111	Tejido urbano continuo	0,2
112	Tejido urbano discontinuo	0,3
121	Zonas industriales o comerciales	0
123	Zonas portuarias	0,4
124	Aeropuertos	0,3
1315	Explotación de materiales de construcción	0,8
141	Zonas verdes urbanas	0,3
2121	Arroz	0,5
2152	Yuca	0,5
2211	Otros cultivos permanentes herbáceos	0,5
2213	Plátano y banano	0,5
2221	Otros cultivos permanentes arbustivos	0,8
2223	Cacao	0,6
2232	Palma de aceite	0,6
231	Pastos limpios	0,6
232	Pastos arbolados	0,5
233	Pastos enmalezados	0,3
242	Mosaico de pastos y cultivos	0,5
2431	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales arbóreos	0,5
2441	Mosaico de pastos con espacios naturales arbóreos	0,7
2442	Mosaico de pastos con espacios naturales arbustivos	0,6
31111	Bosque denso alto de tierra firme	0,6
311121	Bosque denso alto inundable heterogéneo	0,7
311123	Palmar	0,6
31121	Bosque denso bajo de tierra firme	0,6
31122	Bosque denso bajo inundable	0,7
31211	Bosque abierto alto de tierra firme	0,6
31212	Bosque abierto alto inundable	0,6
31311	Bosque fragmentado alto con pastos y cultivos	0,7
31321	Bosque fragmentado alto con vegetación secundaria	0,7
3141	Bosque de galería alto	0,5
3142	Bosque de galería bajo	0,5
3152	Plantación de latifoliadas	0,5
321123	Arracacha	0,4
32121	Herbazal abierto arenoso	0,5
3231	Vegetación secundaria alta	0,5
3232	Vegetación secundaria baja	0,4
3331	Tierras erosionadas	0,9
3332	Remoción en masa	1
334	Zonas quemadas	0,5
411	Zonas pantanosas	0,3
413	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	0,2
421	Pantanos costeros	0,2
511	Ríos	0,2
99	Sin información	0

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 23. Propensividad a inestabilidad según el tipo de Cobertura (CORINE LAND COVER)



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

#### 2.1.2.4.4 Presencia y espesor de depósitos o Unidad geológica superficial (UGS)

La variación del tipo de material del área de estudio influye en la generación de movimientos en masa ya que la inestabilidad de las laderas depende de sus propiedades geomecánicas. La información de UGS define la presencia o ausencia y profundidad de un depósito de suelo, típicamente se define como variable continua ESPESOR según la profundidad y variable binaria ROC-SUE con valores 1 para celdas sin depósito y 2 para celdas donde existe depósito. Los mapas de unidades geológicas superficiales contienen la zonificación por materiales geológicos y a partir de esta se asigna un peso a cada sector en función del tipo de material, origen y espesor, planteando su propensión en una variable categórica denominada UGS que incluye las dos mencionadas (ROC-SUE y ESPESOR) y elimina la dependencia estadística de las mismas.

La Figura 24 muestra el peso asignado a cada tipo de unidad geológica superficial de acuerdo a su influencia en la susceptibilidad a procesos de remoción en masa. En la Tabla 12 se presenta la clasificación y los pesos asignados a cada una de las clases de acuerdo a sus características (calificación de la propensividad).

- **Formato:** Vector tipo polígono.
- **Fuente:** Unidades Geológicas Superficiales - Consultor.

**Tabla 12. Calificación y categorización según el tipo de unidad geológica superficial.**

Nomenclatura	Unidad Geológica Superficial	Cal
Rbcoiad-Srs1	Roca blanda del miembro inferior de la Formación Corpa en ambiente denudacional	0,7
Rbcoiaf-Srs1	Roca blanda del miembro inferior de la Formación Corpa en ambiente fluvial	0,3
Rdbmad-Srii1	Roca dura del batolito de Mandé en ambiente denudacional	0,5
Rdbmae-Srii1	Roca dura del batolito de Mandé en ambiente estructural	0,4
Rdpavad-Srs1	Roca dura de la Formación Pavo Inferior en ambiente denudacional	0,6
Rdpavae-Srs1	Roca dura de la Formación Pavo Inferior en ambiente estructural	0,4
Rmbcgad-Sriv1	Roca muy blanda del miembro Urrao del grupo Cañas Gordas en ambiente denudacional	0,7
Rmbcomaa-Srs1	Roca muy blanda del medio de la Formación Corpa en ambiente antrópico	0,6
Rmbcomad-Srs1	Roca muy blanda del medio de la Formación Corpa en ambiente denudacional	0,7
Rmbcomae-Srs1	Roca muy blanda del medio de la Formación Corpa en ambiente estructural	0,4
Rmbcosad-Srs1	Roca muy blanda del superior de la Formación Corpa en ambiente denudacional	0,6
Rmbcscad-Sriv1	Roca muy blanda del Complejo Santa Cecilia la Equis en ambiente denudacional	0,5
Rmbcscae-Sriv1	Roca muy blanda del Complejo Santa Cecilia la Equis en ambiente estructural	0,4
Stc1	Suelo transportado coluvial	0,8
Stf1	Suelo transportado fluvial aluvial reciente	0,3
Stf2	Suelo transportado fluvial llanura de inundación	0,2
Stf3	Suelo transportado fluvial terrazas	0,2
Stf4	Suelo transportado fluvial abanico aluvial	0,4
Stl1	Suelo transportado fluvial lacustre	0,1
Stlf1	Suelo transportado fluvial depósitos fluvio-lacustres	0,2
Strae	Suelo transportado de rellenos antrópicos	0,5

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017



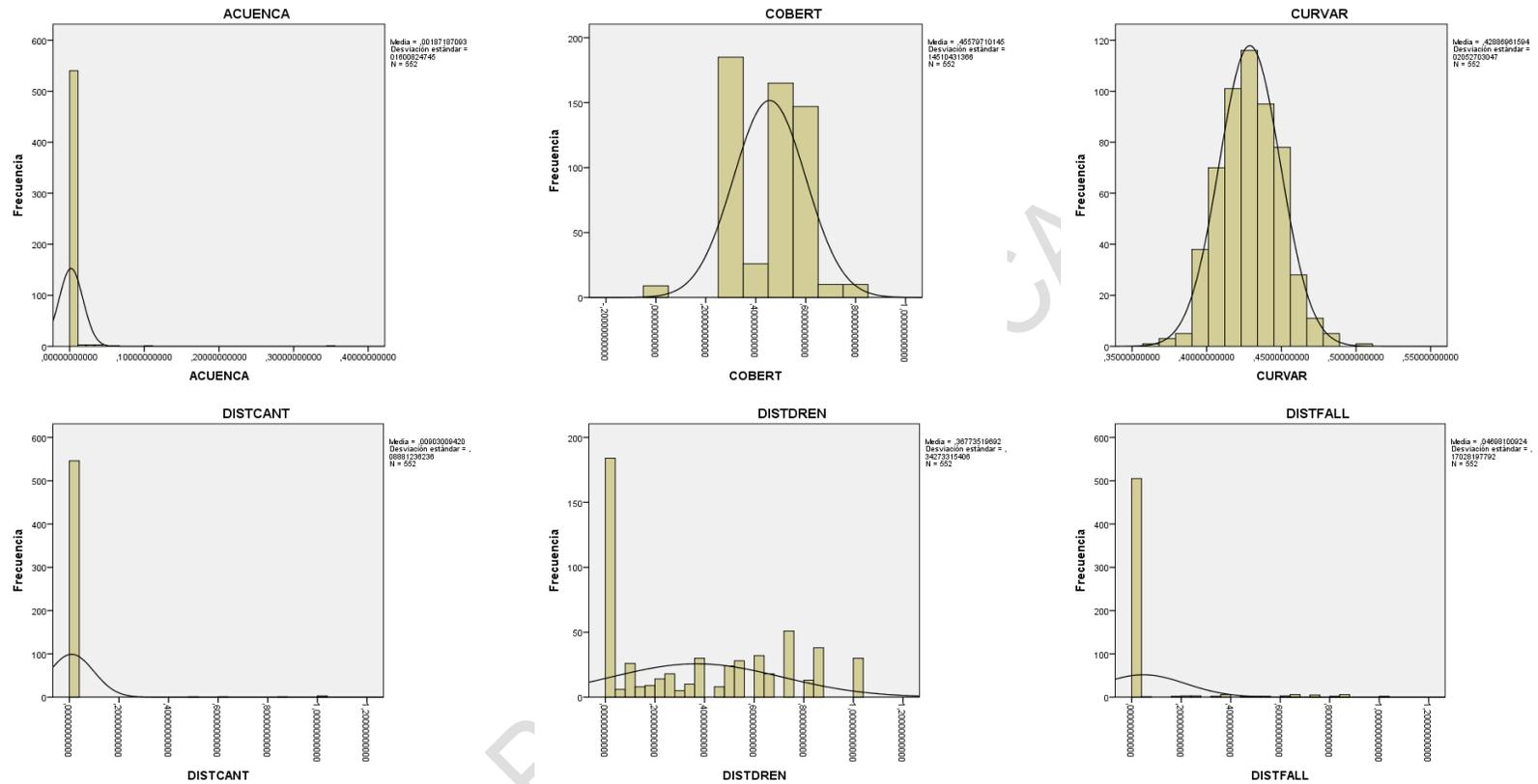
propensividad no es muy marcada, de manera que hay ciertas zonas en que se muestra alguna afectación como sucede con los cultivos herbáceos y otras zonas que no afectan ni aportan. Los tejidos urbanos son propensos a movimientos en masa por la existencia de cortes en el terreno, pero estos son de pequeña magnitud y no se consideran en la escala de análisis, por lo cual se mantienen como poco propensos a la generación de grandes movimientos en masa; en cambio, los cortes en vías y canteras sí resultan relevantes, de manera que las coberturas relacionadas con estas califican con propensividad alta

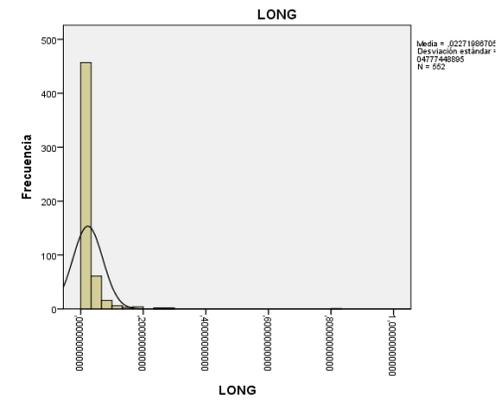
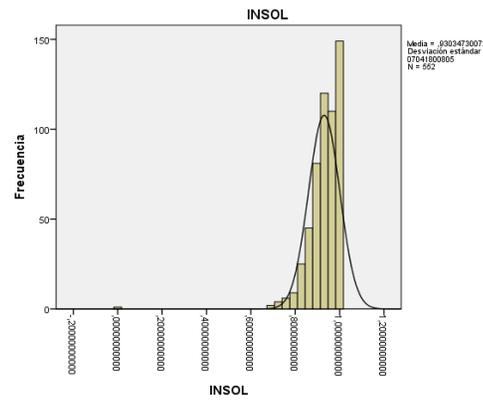
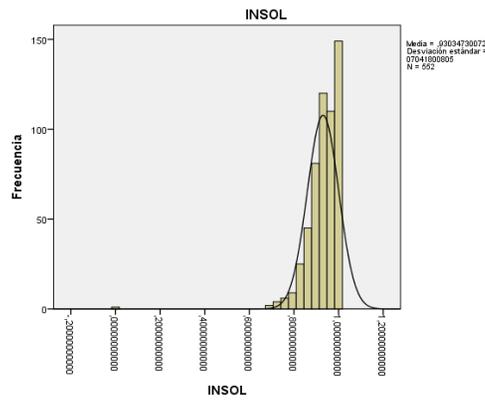
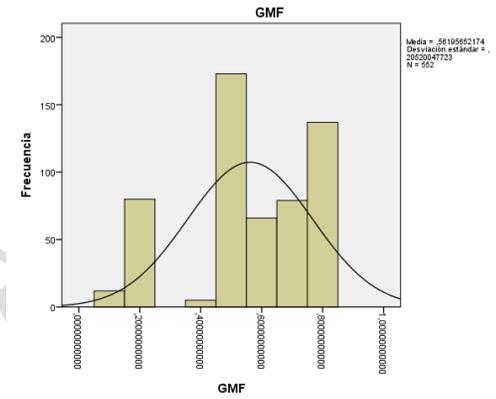
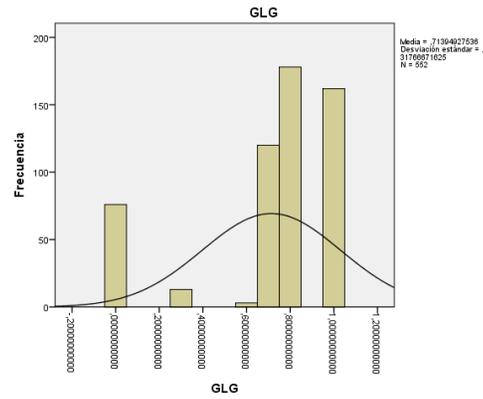
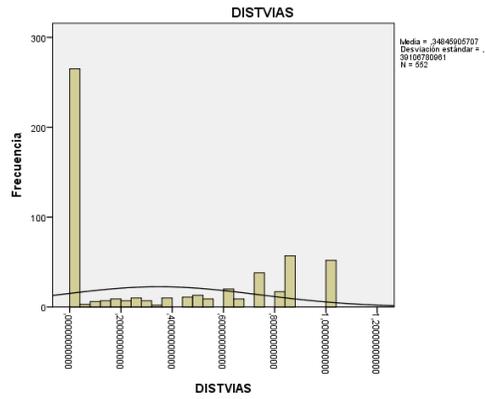
### **2.1.3 Análisis de la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa**

#### **2.1.3.1 Análisis estadístico de la función discriminante para obtener susceptibilidad a movimientos en masa**

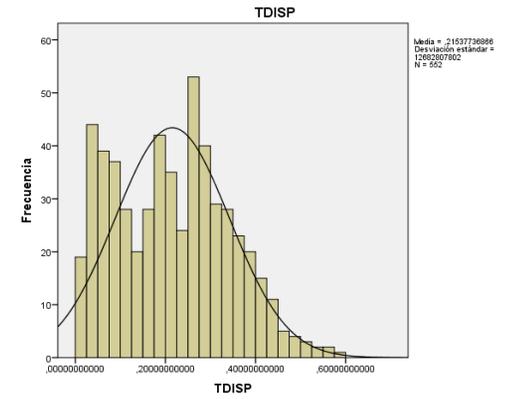
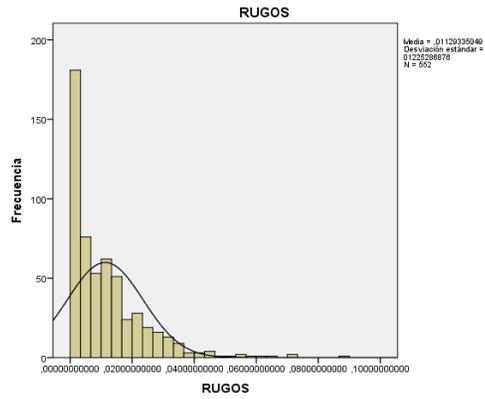
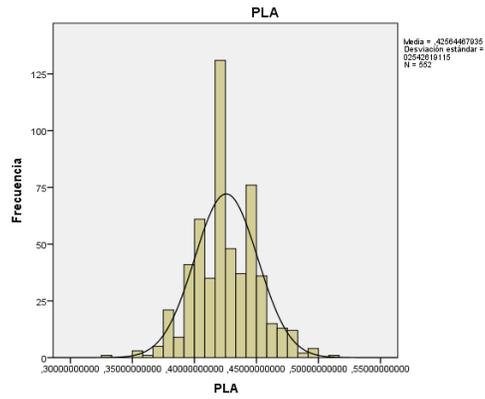
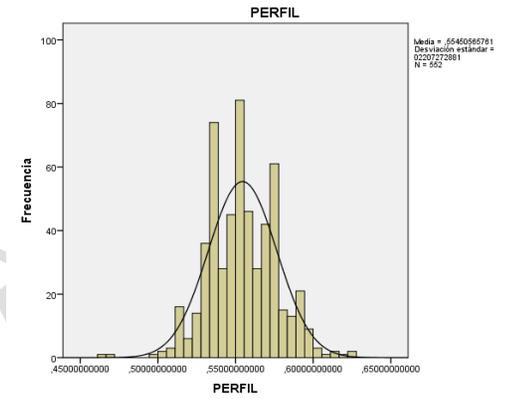
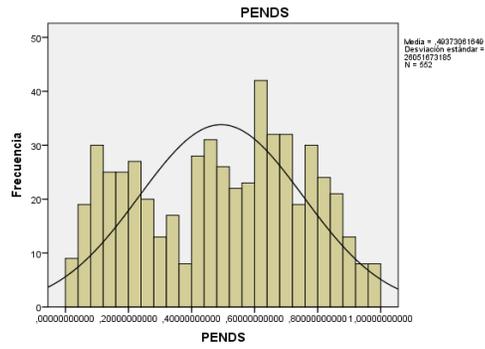
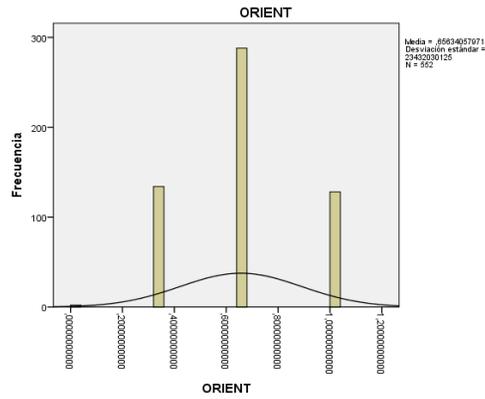
Inicialmente es necesario realizar pruebas estadísticas para conocer la distribución que tiene cada variable y validar si siguen una distribución normal para definir la pertinencia de su utilización dentro del modelo. De entre las diferentes pruebas que analizan el ajuste a una distribución normal se ha seleccionado el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). El test K-S permite conocer la bondad del ajuste mediante el contraste entre la función de distribución acumulada empírica de la variable y la distribución acumulada teórica normal. Para ello utiliza la media y la desviación estándar de la muestra. Las distribuciones y prueba K-S se indican a continuación:

Figura 25. Histogramas de distribución de los factores de propensividad





EN ETAF



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

EN ETAF

**Tabla 13. Prueba Kolmogorov – Sminorv**

	ACUENCA	COBERT	CURVAR	DISTCANT	DISTDREN	DISTFALL	DISTVIAS	GLG	GMF	
N	552	552	552	552	552	552	552	552	552	
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	,0018718709	,4557971014	,4288696159	,0090300942	,3677351969	,0469810092	,3484590571	,7139492754	,5619565217
	Desviación estándar	,0160082474	,1451043137	,0205270305	,0888123624	,3427331541	,1702819779	,3910678096	,3176667162	,2052004772
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,453	,221	,111	,530	,183	,522	,290	,316	,206
	Positivo	,438	,210	,111	,530	,183	,522	,290	,184	,128
	Negativo	-,453	-,221	-,099	-,460	-,142	-,391	-,186	-,316	-,206
Estadístico de prueba	,453	,221	,111	,530	,183	,522	,290	,316	,206	
Sig. asintótica (bilateral)	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	,000 <sup>c</sup>	

INSOL	LONG	ORIENT	PENDS	PERFIL	PLA	RUGOS	TDISP	UGS
552	552	552	552	552	552	552	552	552
,9303473007	,0227198670	,6563405797	,4937306165	,5545056576	,4256446793	,0112933505	,2153773687	,7601449275
,0704180081	,0477744890	,2343203012	,2605167318	,0220727288	,0254261912	,0122528688	,1268280780	,2566119770
,183	,317	,262	,089	,056	,086	,178	,085	,238
,183	,252	,262	,089	,056	,081	,127	,085	,175
-,122	-,317	-,260	-,079	-,042	-,086	-,178	-,050	-,238
,183	,317	,262	,089	,056	,086	,178	,085	,238
,000 <sup>c</sup>								

- a. La distribución de prueba es normal
- b. Se calcula a partir de datos
- c. Corrección de significación de Liliefors

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Si bien es cierto que las variables no siguen estrictamente una distribución normal, estas al transformarlas en busca de una mejor distribución pierden información relevante para el modelo y continúan sin sostener un ajuste en distribución normal, lo que redundaría en una efectividad menor de la función discriminante. Por lo tanto, se opta por realizar el análisis discriminante de variables con su distribución original para finalmente normalizar los resultados y representar la susceptibilidad ya sea buscando una transformación de los resultados o ajustando los rangos de clasificación buscando una distribución adecuada de los mismos.

Otra prueba realizada fue la de dependencia entre variables, con lo que se realizó un análisis factorial para determinar la siguiente matriz de correlación:

Tabla 14. Matriz de correlación

PARÁMETRO	COBERT	CURVAR	DISTCANT	DISTDREN	DISTFALL	DISTVIAS	GLG	GMF	INSOL	ORIENT	PENDS	PERFIL	PLA	RUGOS	PEND	UGS
<b>COBERT</b>	1,000	,041	,017	,082	-,115	-,179	,198	,196	-,144	-,024	,250	-,034	,036	,195	,242	,213
<b>CURVAR</b>	,041	1,000	-,089	-,150	-,067	,017	-,024	-,060	,030	-,031	-,029	-,862	,854	-,006	-,023	-,016
<b>DISTCANT</b>	,017	-,089	1,000	,043	,019	-,038	,002	,022	-,119	,123	,077	,096	-,056	,126	,091	-,068
<b>DISTDREN</b>	,082	-,150	,043	1,000	-,090	-,212	,226	,179	-,044	,032	,123	,133	-,124	,061	,110	,212
<b>DISTFALL</b>	-,115	-,067	,019	-,090	1,000	,075	,044	,029	-,014	-,043	,012	,081	-,033	,005	,010	,037
<b>DISTVIAS</b>	-,179	,017	-,038	-,212	,075	1,000	-,268	-,327	,213	,018	-,321	-,006	,023	-,220	-,302	-,225
<b>GLG</b>	,198	-,024	,002	,226	,044	-,268	1,000	,833	-,342	,017	,539	,030	-,010	,353	,503	,883
<b>GMF</b>	,196	-,060	,022	,179	,029	-,327	,833	1,000	-,398	-,003	,580	,067	-,035	,393	,545	,801
<b>INSOL</b>	-,144	,030	-,119	-,044	-,014	,213	-,342	-,398	1,000	-,035	-,718	-,083	-,032	-,773	-,752	-,322
<b>ORIENT</b>	-,024	-,031	,123	,032	-,043	,018	,017	-,003	-,035	1,000	,068	,057	,006	,113	,081	,017
<b>PENDS</b>	,250	-,029	,077	,123	,012	-,321	,539	,580	-,718	,068	1,000	,080	,033	,862	,991	,506
<b>PERFIL</b>	-,034	-,862	,096	,133	,081	-,006	,030	,067	-,083	,057	,080	1,000	-,472	,069	,079	,018
<b>PLA</b>	,036	,854	-,056	-,124	-,033	,023	-,010	-,035	-,032	,006	,033	-,472	1,000	,061	,041	-,009
<b>RUGOS</b>	,195	-,006	,126	,061	,005	-,220	,353	,393	-,773	,113	,862	,069	,061	1,000	,922	,332
<b>PEND</b>	,242	-,023	,091	,110	,010	-,302	,503	,545	-,752	,081	,991	,079	,041	,922	1,000	,472
<b>UGS</b>	,213	-,016	-,068	,212	,037	-,225	,883	,801	-,322	,017	,506	,018	-,009	,332	,472	1,000

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

En donde la mayor correlación se observa entre la pendiente de la ladera (TDISP ó PEND) y las variables rugosidad y pendiente senoidal y entre la geología, geomorfología y UGS. Del anterior análisis se realiza descarte de factores por dependencia de variables (Análisis factorial, pruebas T y ANOVA):

**Tabla 15. Prueba ANOVA**

PARÁMETRO	GRUPO	SUMA DE CUADRADOS	GL	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIG.
CURVAR	Entre grupos	0.001	1	0.001	1.81	0.179
	Dentro de grupos	0.231	550	0.000	---	---
	Total	0.232	551	---	---	---
PERFIL	Entre grupos	0.002	1	0.000	0.019	0.891
	Dentro de grupos	0.266	550	0.001	---	---
	Total	0.268	551	---	---	---
PLA	Entre grupos	0.000	1	0.000	0.019	0.891
	Dentro de grupos	0.356	550	0.001	---	---
	Total	0.356	551	---	---	---
GLG	Entre grupos	15.233	1	15.233	207.545	0.000
	Dentro de grupos	40.369	550	0.073	---	---
	Total	55.603	551	---	---	---
GMF	Entre grupos	8.575	1	8.575	322.459	0.000
	Dentro de grupos	14.626	550	0.027	---	---
	Total	23.201	551	---	---	---
UGS	Entre grupos	9.813	1	9.813	203.905	0.000
	Dentro de grupos	26.470	550	0.048	---	---
	Total	36.283	551	---	---	---
INSOL	Entre grupos	0.863	1	0.863	253.977	0.000
	Dentro de grupos	1.869	550	0.003	---	---
	Total	2.732	551	---	---	---
PENDS	Entre grupos	23.804	1	23.804	963.247	0.000
	Dentro de grupos	13.592	550	0.025	---	---
	Total	37.396	551	---	---	---
RUGOS	Entre grupos	0.037	1	0.037	438.612	0.000
	Dentro de grupos	0.046	550	0.000	---	---
	Total	0.083	551	---	---	---
PEND	Entre grupos	5.447	1	5.447	876.836	0.000
	Dentro de grupos	3.416	550	0.006	---	---
	Total	8.863	551	---	---	---

Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Finalmente, realizadas las pruebas estadísticas que aportan a los criterios de descarte de variables, se realiza el análisis discriminante tantas veces como sea posible para obtener

la función discriminante que mejor ajuste tiene. Los análisis discriminantes realizados se indican a continuación.

### 2.1.3.1.1 Análisis discriminante 1

Descarte de factores por criterio y sin distribución estadística (Histogramas y prueba K-S):

ACUENCA, LONG

Descarte de factores por dependencia de variables (Análisis factorial, pruebas T y ANOVA):

Criterio T: CURVAR, PERFIL, GMF, UGS, INSOL, PENDS, PEND

Criterio ANOVA: CURVAR, PLA, GLG, UGS, INSOL, RUGOS, PEND

***Coefficientes Función discriminante 1 (mayor número de factores y pendiente en PENDS):***

- COBERT 1,056
- DISTCANT -,357
- DISTDREN ,678
- DISTFALL -,482
- DISTVIAS ,835
- ORIENT ,682
- PENDS 5,582
- PERFIL 3,984
- UGS 1,183
- (Constante) -6,284

Resultados de clasificación: 84,5% de casos agrupados correctamente.

### 2.1.3.1.2 Análisis discriminante 2

Descarte de factores por criterio y sin distribución estadística (Histogramas y prueba K-S):

ACUENCA, LONG

Descarte de factores por dependencia de variables (Análisis factorial, pruebas T y ANOVA):

Criterio T: CURVAR, PERFIL, GMF, UGS, INSOL, PENDS, PEND

Criterio ANOVA: CURVAR, PLA, GLG, UGS, INSOL, RUGOS, PEND

***Coefficientes Función discriminante 2 (mayor número de factores y pendiente en PEND):***

- COBERT 1,056
- DISTCANT -,357
- DISTDREN ,678
- DISTFALL -,438

- DISTVIAS ,835
- ORIENT ,682
- PEND 6,482
- PERFIL 3,924
- UGS 1,583
- (Constante) -6,284

Resultados de clasificación: 83,2% de casos agrupados correctamente.

La función que mejor clasificación presenta es la número 1, con la cual se realiza el cálculo de la susceptibilidad a movimientos en masa, a partir de la cual se definen las zonas de calificación media o alta para la ejecución de un muestreo de caracterización de comportamiento geomecánico de materiales.

Por lo anterior y considerando que la función 1 evaluada tiene resultados de clasificación cercanos al 84,5%, se opta por calcular la susceptibilidad con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 Susc_{MM} = & 5.582 * PENDS + 0.835 * DISTVIAS - 0.482 * DISTFALL - 0.357 \\
 & * DISTCANT + 0.678 * DISTDREN + 1.056 * COBER + 1.183 * UGS \\
 & + 0.682 * ORIENT + 3.984 * PERFIL
 \end{aligned}$$

### 2.1.3.2 Análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa

A partir de la ponderación, calificación y categorización de las variables anteriormente descritas y analizadas, se elabora el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para la cuenca hidrográfica donde se identifican los sectores con baja, media y alta susceptibilidad para este tipo de eventos, los cuales se encuentran representados en la Figura 26. El resultado se obtiene de la función que en conjunto expresa una mejor realidad del territorio, el cual al ser estadístico se clasifica según los intervalos naturales que presenta (Ver anexo mapa de susceptibilidad a movimientos en masa).

La susceptibilidad a movimientos en masa está condicionada principalmente por la morfología del relieve, en especial por la pendiente y la rugosidad de la ladera, seguido de las unidades geológicas superficiales y las coberturas de la tierra. Por esta razón, se observan valores altos de susceptibilidad (aproximadamente 6,6% del área, correspondiente a 14638 ha) en sectores donde predominan las pendientes altas, con algunas variaciones según las otras variables mencionadas.

Por su parte, sectores de la cuenca baja alcanzan una susceptibilidad baja (aproximadamente un 74,6% de la cuenca, que corresponde con 164069,82 ha) principalmente por los bajos contrastes morfométricos de esta zona asociados a bajas pendientes y a la llanura aluvial del río León.

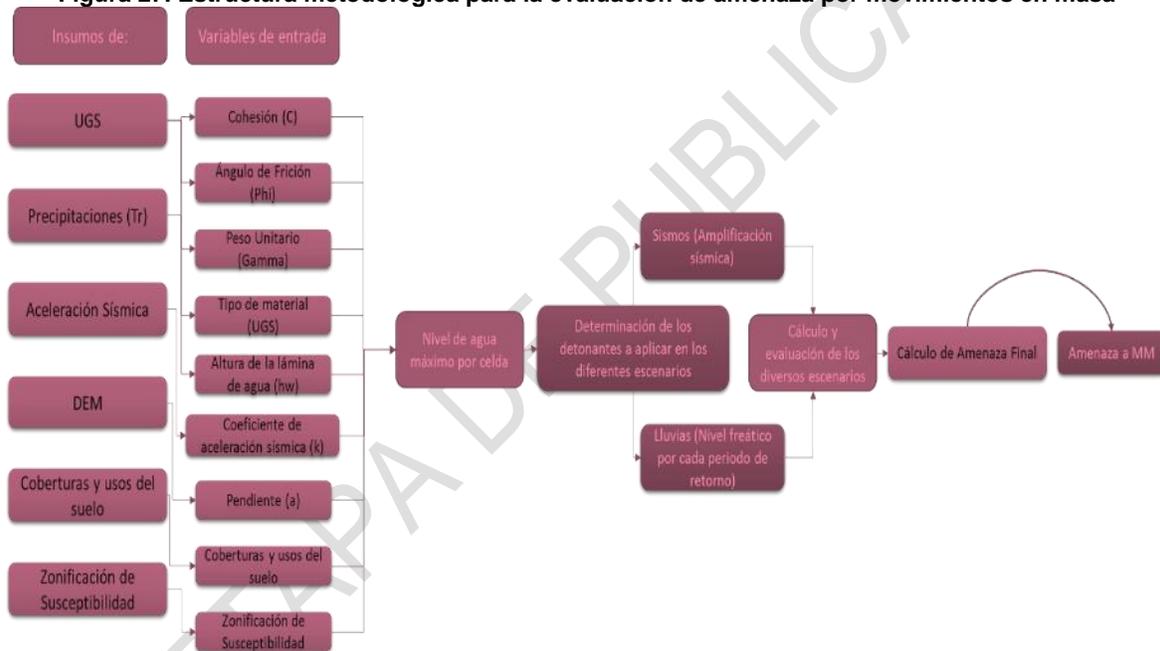
Para el resto de la cuenca se estima una susceptibilidad media (aproximadamente el 18,8% del área correspondiente a 41429,72 ha). En general, en la cuenca se observa una gran tendencia a susceptibilidad baja, exceptuando en los límites este y norte de la misma.



cual sugiere un procedimiento determinístico y la valoración de diversos escenarios con presencia de agua y sismo en diferentes periodos de retorno. En la Figura 27 se describe metodológicamente la obtención de la amenaza por movimientos en masa.

A partir de cartografía base de geología y geomorfología, así como de los resultados del programa de exploración del suelo y ensayos de laboratorio realizados, se planteó el modelo geológico geotécnico que representa las zonas homogéneas de comportamiento geomecánica. Para su planteamiento se realizó el cruce espacial de los puntos de control de campo realizados que permiten la asignación directa de los parámetros de comportamiento mecánico en el caso de las unidades geotécnicas que coinciden con al menos uno de los puntos de control. Los parámetros de resistencia descritos se encuentran en el Anexo 3, para lo cual se asignaron en este caso para cada celda considerando promedios ponderados y aproximaciones según las muestras que contienen información, asignándose un único valor de cada parámetro a cada píxel.

**Figura 27. Estructura metodológica para la evaluación de amenaza por movimientos en masa**



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Una vez definidos los parámetros geotécnicos, se debe tener en cuenta la determinación de los detonantes a aplicar para diferentes escenarios (niveles freáticos y aceleración sísmica). Para considerar la condición de sismicidad se incluyó el efecto de la carga sísmica como una fuerza inercial horizontal a partir del coeficiente de aceleración horizontal en análisis de equilibrio límite pseudo estático. Se partió de los valores regionales de amenaza según el estudio de Amenaza Sísmica Nacional referido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10, el cual se describe con detalle en el numeral 2.1.5.2.

Para la evaluación del nivel freático se plantea la hipótesis en la que el mismo se encuentra en la superficie de falla y varía según el régimen de lluvias de cada píxel. El análisis de

lluvia considera el concepto de una proporción de ésta que cae al suelo y se infiltra, otro porcentaje queda detenido en la vegetación y en depresiones del suelo mientras se evapora y otro fluye como escorrentía directa. La cantidad de lluvia se obtuvo con los análisis de precipitaciones realizados en el componente de Clima indicada en valores de precipitación máxima diaria por períodos de retorno de 2, 5, 20, 50 y 100 años.

Para estimar dicha fracción de agua infiltrada se sugiere por el protocolo usar el método Alzate (2012) y Torres et al., (2014) que plantea una ecuación empírica en función de los factores que influyen en el proceso de infiltración. Sin embargo, dicha ecuación empírica propone el término de precipitación en el denominador, lo que indicaría menores niveles freáticos con mayores precipitaciones. Por lo anterior, se amplió el análisis utilizando el método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del U. S. Department of Agriculture, el cual muy frecuentemente se utiliza para estimar cantidad de agua proveniente de una tormenta ( $P$ ) que se convierte en escorrentía directa ( $P_e$ ), pero que para este caso se estimó el complemento, esto es, el resto de la lluvia que no se convierte en escorrentía directa, sino que se infiltra, es decir: ( $P_i = P - P_e$ ).

El método del SCS propone la estimación del Número de Curva (CN) en función de la cobertura y uso del suelo y un potencial de retención que se compara con las precipitaciones para obtener los valores de infiltración posibles, lo cual se describe en el numeral 2.1.5.1.

Finalmente, luego de definidos los factores condicionantes en función de las características y propiedades geomecánicas de los materiales y los factores detonantes a partir de la información de amenaza sísmica y precipitaciones, se procede a la definición de la amenaza por movimientos en masa. Para la zonificación básica de amenaza se determinó el factor de seguridad de cada unidad de trabajo (píxel 12.5 m), definidas por la malla y las columnas de suelo obtenidas.

El cálculo de la condición de estabilidad se basa en el método de equilibrio límite aplicando la ecuación de factor de seguridad para el método de bloque deslizante en un talud infinito (Newmark, 1965), para superficies de falla superficiales planas asociadas a deslizamientos traslacionales en cada una de las celdas de trabajo. La ecuación de factor de seguridad se expresa de la siguiente manera:

$$FS = \frac{c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w b \cos^2 \alpha) \tan \Phi'}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha}$$

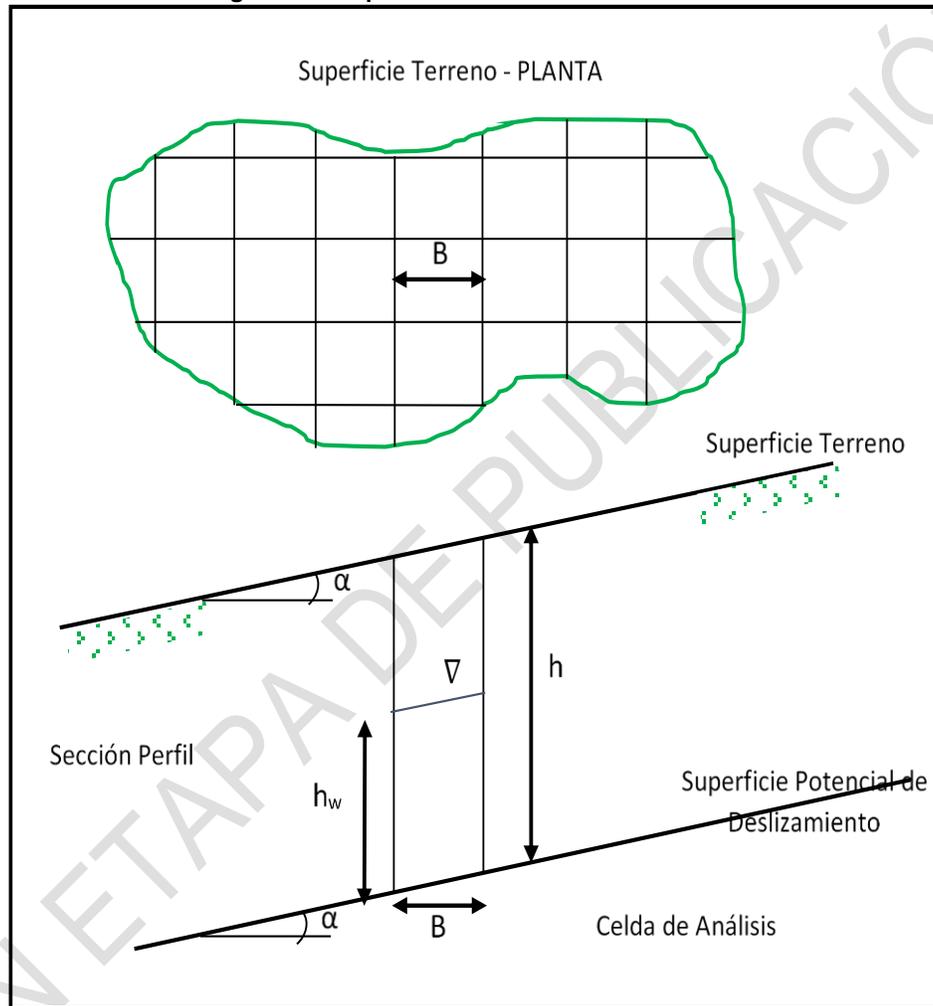
Donde:

- c**: es la cohesión del material
- $\alpha$** : es la pendiente del terreno
- k**: es el coeficiente de amplificación sísmica
- hw**: es el valor de la tabla de agua
- $\Phi'$** : Es el ángulo de fricción del material
- $\gamma$** : Gamma es el peso unitario del material

En la Figura 28 se ilustran los parámetros geométricos indicados, (SGC, 2015).

El factor de seguridad se debe calcular en al menos diez (10) escenarios que corresponden con los parámetros considerando la profundidad de suelo según las interfaces suelo-roca con ausencia y presencia de agua como detonante modificado por las precipitaciones con períodos de retorno de 2, 5, 20, 50 y 100 años y presencia o ausencia de sismo con período de retorno de 475 años. En esta zonificación de amenaza para la cuenca del río León se calcularon estos escenarios mínimos requeridos y adicionalmente 88 escenarios más considerando más períodos de retorno de lluvias y varias profundidades de falla posibles.

Figura 28. Esquema del modelo de talud infinito



Fuente: SGC, 2015

El factor de seguridad se debe calcular en al menos diez (10) escenarios que corresponden con los parámetros considerando la profundidad de suelo según las interfaces suelo-roca con ausencia y presencia de agua como detonante modificado por las precipitaciones con períodos de retorno de 2, 5, 20, 50 y 100 años y presencia o ausencia de sismo con período de retorno de 475 años. En esta zonificación de amenaza para la cuenca del río León se calcularon estos escenarios mínimos requeridos y adicionalmente 88 escenarios más considerando más períodos de retorno de lluvias y varias profundidades de falla posibles.

Según las observaciones de campo, los espesores de materiales pueden variar entre los 3 y los 7 metros y la cuenca presenta cambios morfométricos importantes en toda su área que indican variaciones espaciales importantes de espesores. Los suelos tienen un espesor promedio de 4 y 8 metros, por lo cual se evalúa un promedio de contacto suelo-roca para el cálculo de los diez escenarios mínimos requeridos y se evalúan más profundidades de falla posibles en función de los espesores posibles.

El resultado final para la cuenca hidrográfica es el cálculo del factor de seguridad en cada celda o píxel para 98 casos correspondientes a 10 escenarios (Tabla 16) en distintas posibilidades de ocurrencia de falla (Tabla 17), que relacionan variaciones de nivel freático, presencia de aceleración sísmica, distintas profundidades de falla y condición media a desfavorable de parámetros geomecánicos por la presencia de materiales por encima de la superficie de falla. La evaluación de este número de escenarios permite conocer la condición de estabilidad de los materiales con la variabilidad espacial del espesor de suelo y la valoración probabilística de amenaza para que esta sea expresada en términos de probabilidad de falla.

**Tabla 16. Escenarios de factor de seguridad evaluados para la cuenca hidrográfica**

ESCENARIO	PRESENCIA DE SISMO	PRESENCIA DE AGUA* (M)
Escenario 1: Seco con sismo	Sí	No
Escenario 2: Seco sin sismo	No	No
Escenario 3: Precipitación 2 años con sismo	Sí	hw2
Escenario 4: Precipitación 2 años sin sismo	No	hw2
Escenario 5: Precipitación 20 años con sismo	Sí	hw20
Escenario 6: Precipitación 20 años sin sismo	No	hw20
Escenario 7: Precipitación 50 años con sismo	Sí	hw50
Escenario 8: Precipitación 50 años sin sismo	No	hw50
Escenario 9: Precipitación 100 años con sismo	Sí	hw100
Escenario 10: Precipitación 100 años sin sismo	No	hw100

\*Los valores hw representan la variación de nivel freático por infiltración a partir de precipitaciones por período de retorno  
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

**Tabla 17. Posibilidades de falla agrupadas por escenario**

ESCENARIO	CONDICIÓN	PRESENCIA DE SISMO	PRESENCIA DE AGUA* (M)	PROFUNDIDAD MEDIA DE FALLA (M)
Escenario 1: Seco con sismo	2mk	Sí	No	2m
	3mk	Sí	No	3m
	4mk	Sí	No	4m
	5mk	Sí	No	5m
	6mk	Sí	No	6m
Escenario 2: Seco sin sismo	2m	No	No	2m
	3m	No	No	3m
	4m	No	No	4m
	5m	No	No	5m
	6m	No	No	6m
Escenario 3: Precipitación 2 con sismo	2mhw2k	Sí	hw2	2m
	2mhw5k	Sí	hw5	2m
	3mhw2k	Sí	hw2	3m
	3mhw5k	Sí	hw5	3m
	4mhw2k	Sí	hw2	4m
	4mhw5k	Sí	hw5	4m
	5mhw2k	Sí	hw2	5m

ESCENARIO	CONDICIÓN	PRESENCIA DE SISMO	PRESENCIA DE AGUA* (M)	PROFUNDIDAD MEDIA DE FALLA (M)
	5mhw5k	Sí	hw5	5m
	6mhw2k	Sí	hw2	6m
	6mhw5k	Sí	hw5	6m
Escenario 4: Precipitación 2 sin sismo	2mhw2	No	hw2	2m
	2mhw5	No	hw5	2m
	3mhw2	No	hw2	3m
	3mhw5	No	hw5	3m
	4mhw2	No	hw2	4m
	4mhw5	No	hw5	4m
	5mhw2	No	hw2	5m
	5mhw5	No	hw5	5m
	6mhw2	No	hw2	6m
	6mhw5	No	hw5	6m
Escenario 5: Precipitación 20 con sismo	2mhw10k	Sí	hw10	2m
	2mhw20k	Sí	hw20	2m
	3mhw10k	Sí	hw10	3m
	3mhw20k	Sí	hw20	3m
	4mhw10k	Sí	hw10	4m
	4mhw20k	Sí	hw20	4m
	5mhw10k	Sí	hw10	5m
	5mhw20k	Sí	hw20	5m
	6mhw10k	Sí	hw10	6m
	6mhw20k	Sí	hw20	6m
Escenario 6: Precipitación 20 sin sismo	2mhw10	No	hw10	2m
	2mhw20	No	hw20	2m
	3mhw10	No	hw10	3m
	3mhw20	No	hw20	3m
	4mhw10	No	hw10	4m
	4mhw20	No	hw20	4m
	5mhw10	No	hw10	5m
	5mhw20	No	hw20	5m
	6mhw10	No	hw10	6m
	6mhw20	No	hw20	6m
Escenario 7: Precipitación 50 con sismo	2mhw50k	Sí	hw50	2m
	3mhw50k	Sí	hw50	3m
	4mhw50k	Sí	hw50	4m
	5mhw50k	Sí	hw50	5m
Escenario 8: Precipitación 50 sin sismo	6mhw50k	Sí	hw50	6m
	2mhw50	No	hw50	2m
	3mhw50	No	hw50	3m
	4mhw50	No	hw50	4m
	5mhw50	No	hw50	5m
Escenario 9: Precipitación 100 con sismo	6mhw50	No	hw50	6m
	2m1_5mk	Sí	1.5m	2m
	2mhw100k	Sí	hw100	2m
	3m2mk	Sí	2m	3m
	3mhw100k	Sí	hw100	3m
	4m3mk	Sí	3m	4m
	4mhw100k	Sí	hw100	4m
	5m4mk	Sí	4m	5m
	5mhw100k	Sí	hw100	5m
	6m5mk	Sí	5m	6m
6mhw100k	Sí	hw100	6m	
	2m1_5m	No	1.5m	2m

ESCENARIO	CONDICIÓN	PRESENCIA DE SISMO	PRESENCIA DE AGUA* (M)	PROFUNDIDAD MEDIA DE FALLA (M)
Escenario 10: Precipitación 100 sin sismo	2mhw100	No	hw100	2m
	3m2m	No	2m	3m
	3mhw100	No	hw100	3m
	4m3m	No	3m	4m
	4mhw100	No	hw100	4m
	5m4m	No	4m	5m
	5mhw100	No	hw100	5m
	6m5m	No	5m	6m
6mhw100	No	hw100	6m	

\*Los valores hw representan la variación de nivel freático por infiltración de precipitaciones por período de retorno  
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

La condición de amenaza puede ser representada en el Factor de Seguridad siempre que se clasifique en los rangos o clases mostradas en la Tabla 18 para cada escenario en particular como se muestra en el anexo-4 digital GDB “Escenarios” adicional con el catálogo de ráster de escenarios, los cuales indican los resultados del factor de seguridad para los 10 escenarios calculados en las distintas posibilidades de falla de los materiales representados en un total de 98 evaluaciones.

Sin embargo, las evaluaciones de riesgo por movimientos en masa se pueden desarrollar sobre una condición general de amenaza en lugar de escenarios particulares, de manera que no se exprese en términos de factor de seguridad para un escenario seleccionado sino en función de la combinación de todos los escenarios posibles. La evaluación de un número mayor de opciones posibles contempla la inclusión de un número mayor de posibilidades de falla (siendo está siempre acotada por el método de evaluación), para representar los resultados en probabilidad de falla, la cual se calculó en cada celda o píxel considerando la media aritmética, varianza y desviación estándar y se clasificó con los rangos que se presentan en la Tabla 19, siendo estos últimos los definitivos para la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

Se calcula el promedio y la varianza del factor de seguridad estimado para los 98 escenarios y se plantea de manera probabilística calculando el factor Z y la probabilidad de falla P según Alzate (2012) de la siguiente manera:

$$Z = \frac{1-FS}{desv(FS)} \quad , \quad P = (0,5 \pm Z) * 100$$

No obstante, el protocolo recomienda calcular la varianza del factor de seguridad final para cada celda de cada uno de los escenarios y no a partir de la combinación misma de todos los escenarios calculados en una misma celda. Si bien la probabilidad de falla se obtiene calculando los factores Z tradicionales para evaluar probabilidad de ocurrencia de FS, para estabilidad de taludes se considera apropiado evaluar directamente la probabilidad de falla (caso en que las fuerzas actuantes son iguales a las fuerzas resistentes en la ecuación del factor de seguridad, es decir, que FS=1), considerando los planteamientos de González (2009); es decir, que si se tiene un resultado de FS igual a uno (1), la posibilidad de falla es la misma a la de la estabilidad, lo que corresponde con una probabilidad de falla del 50%, de manera que considerando una seguridad adicional se plantea la amenaza alta a partir de una probabilidad de falla superior al 40% y la amenaza baja como probabilidad de falla

menor a 0,09%. Esto genera los rangos de probabilidad de falla que son compatibles y comparables con las condiciones de factor de seguridad y clasificaciones mostradas en la Tabla 18, acorde con el Protocolo para la incorporación de gestión de riesgo en POMCAS en el 2015 y SGC en el 2013.

La condición de amenaza se presenta para los 10 escenarios solicitados por el Protocolo en distintas combinaciones de superficies de falla posibles. Estos escenarios representan la amenaza en términos probabilísticos en tres categorías: Alta, Media y Baja. A partir de todas estas evaluaciones de posibilidad de falla (98 en total) se calculó también la amenaza en términos probabilísticos considerando no solo un único escenario sino la combinación de todos ellos, lo cual permite adelantarse a la representación de la amenaza general para toda la cuenca y con la cual resulta más recomendable estimar las condiciones de riesgo, evitando la subjetividad impresa en la selección de un solo escenario en el catálogo de posibilidades calculadas.

**Tabla 18. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases**

NIVEL DE AMENAZA	FACTOR DE SEGURIDAD	COLOR EN EL MAPA
Alta	<1.2	Rojo
Media	1.2 - 1.5	Amarillo
Baja	>1.5	Verde

Fuente: Protocolo para la incorporación de gestión de riesgo en POMCAS, 2015

**Tabla 19. Clasificación de la amenaza por movimientos en masa en 3 clases**

NIVEL DE AMENAZA	PROBABILIDAD DE FALLA	COLOR EN EL MAPA
Alta	0.4 - 1.0	Rojo
Media	0.09-0.4	Amarillo
Baja	0 – 0.09	Verde

Fuente: SGC, 2013

## 2.1.5 Descripción de las variables de amenaza por movimientos en masa

La descripción de las variables empleadas para la evaluación de amenaza y el análisis del resultado de la misma en función de probabilidad de falla se indican a continuación.

### 2.1.5.1 Precipitación

Mide la cantidad de lluvia en milímetros reportadas por las diferentes estaciones ubicadas por el IDEAM a lo largo de la cuenca en estudio. Los valores fueron empleados para la estimación de las curvas IDF del componente hidrológico del presente estudio.

Como se indicó metodológicamente, para estimar la fracción de agua infiltrada la Guía Técnica sugiere usar el método Alzate (2012) y Torres et al., (2014) que plantea una ecuación empírica en función de los factores que influyen en el proceso de infiltración. Sin embargo, dicha ecuación empírica sugiere el término de precipitación ponderada en el denominador como sumando, lo que puede llegar a indicar menores niveles freáticos con

mayores precipitaciones. Por lo anterior, se utilizó el método lluvia-escurrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del U. S. Department of Agriculture.

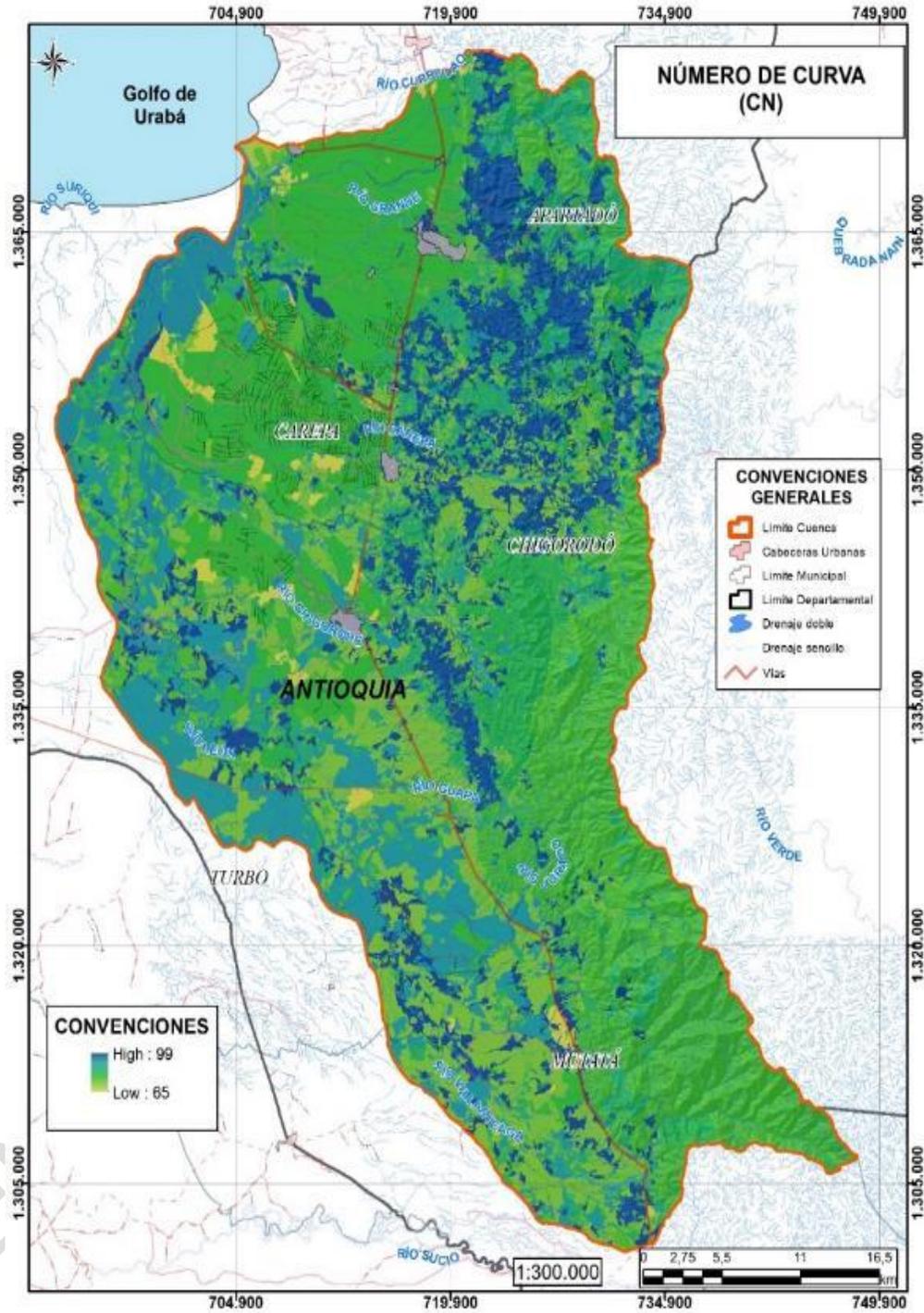
Dentro de la evaluación se emplea el valor de precipitaciones con periodos de retorno de 2, 5, 20, 50 y 100 años cruzado con el tipo de material y cobertura para obtener la retención potencial (S) y la respectiva lámina de agua para la precipitación presente en la cuenca. (Figura 30) y las respectivas láminas de agua para la precipitación presente en la cuenca a lo largo de diferentes periodos de retorno (Ver Figura 31 a Figura 35), las cuales hacen variar la lámina de agua en función de cada periodo de retorno como se observa en el anexo 6 (Escenarios).

Los mayores valores de retención potencial se presentan en el este de la cuenca hacia el piedemonte del municipio de Apartadó hacia el oeste cerca del cauce del río León; en algunos sectores de los municipios de Chigorodó, Carepa y Apartadó se observan valores muy bajos de retención potencial por la presencia de zonas urbanas y de expansión.

La lámina de agua se manifiesta con valores moderados y bajos en gran parte de la cuenca con un aumento significativo hacia el noroeste de la sub zona hidrográfica.

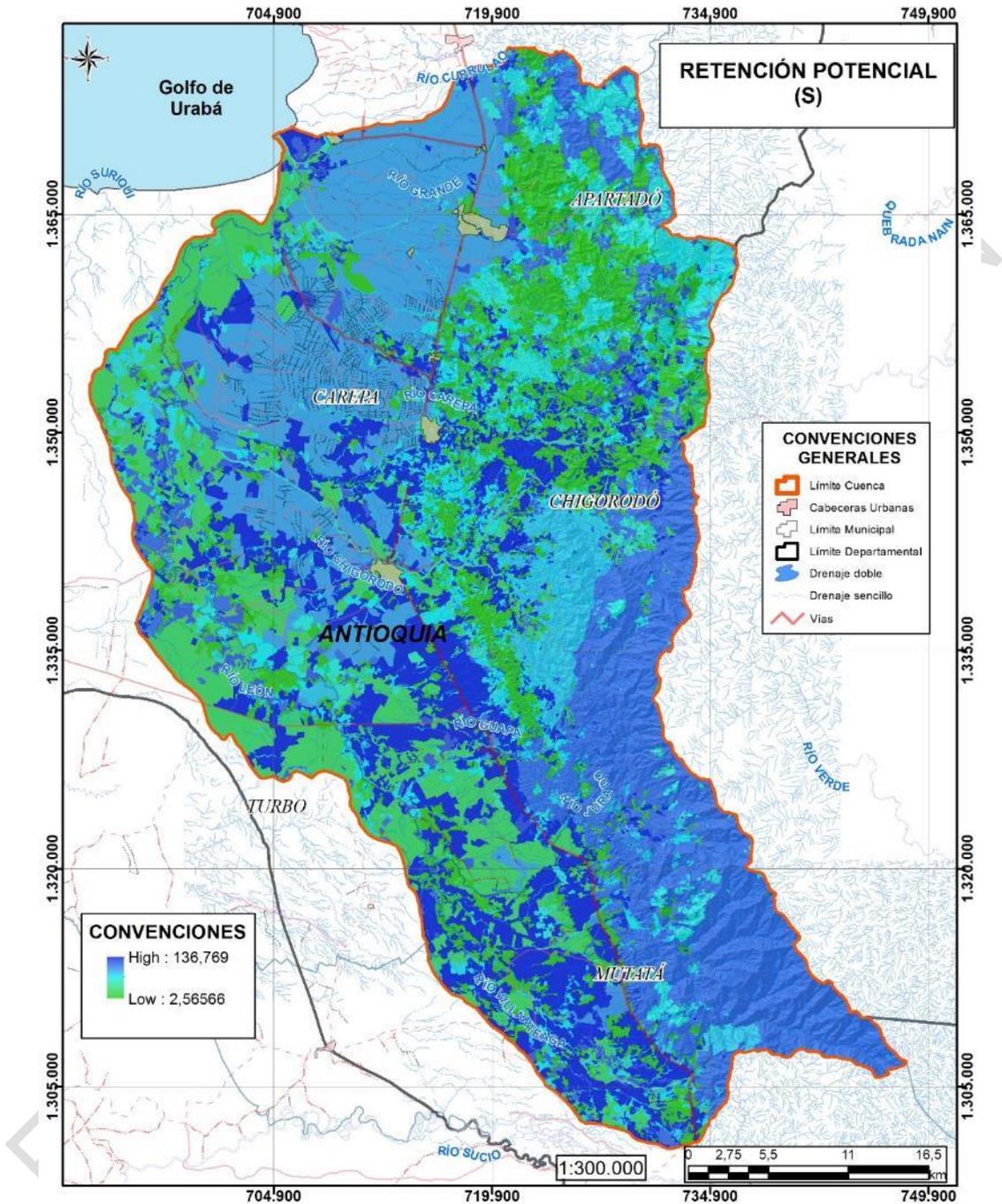
EN ETAPA DE PUBLICACIÓN

Figura 29. Número de curva



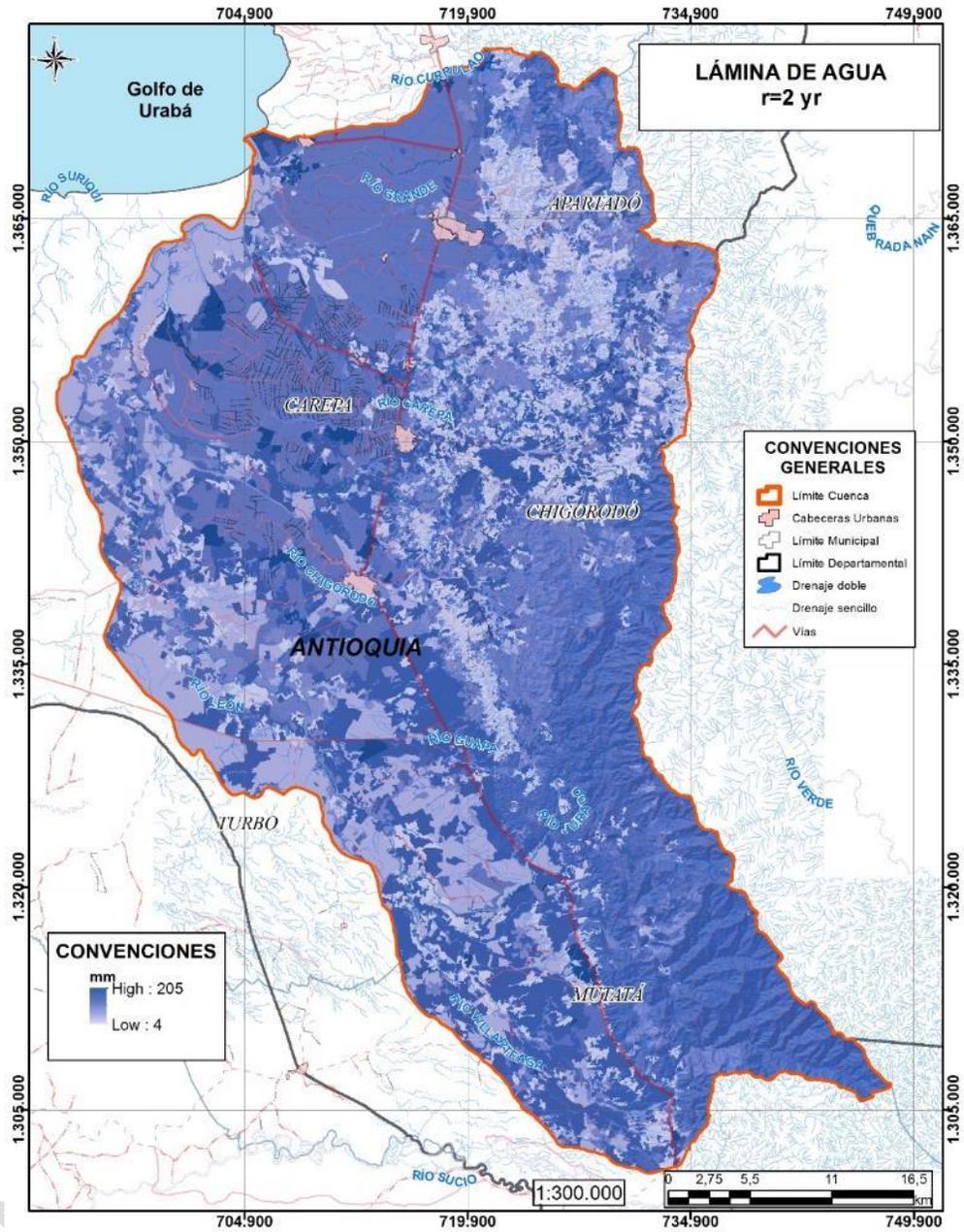
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 30. Retención Potencial



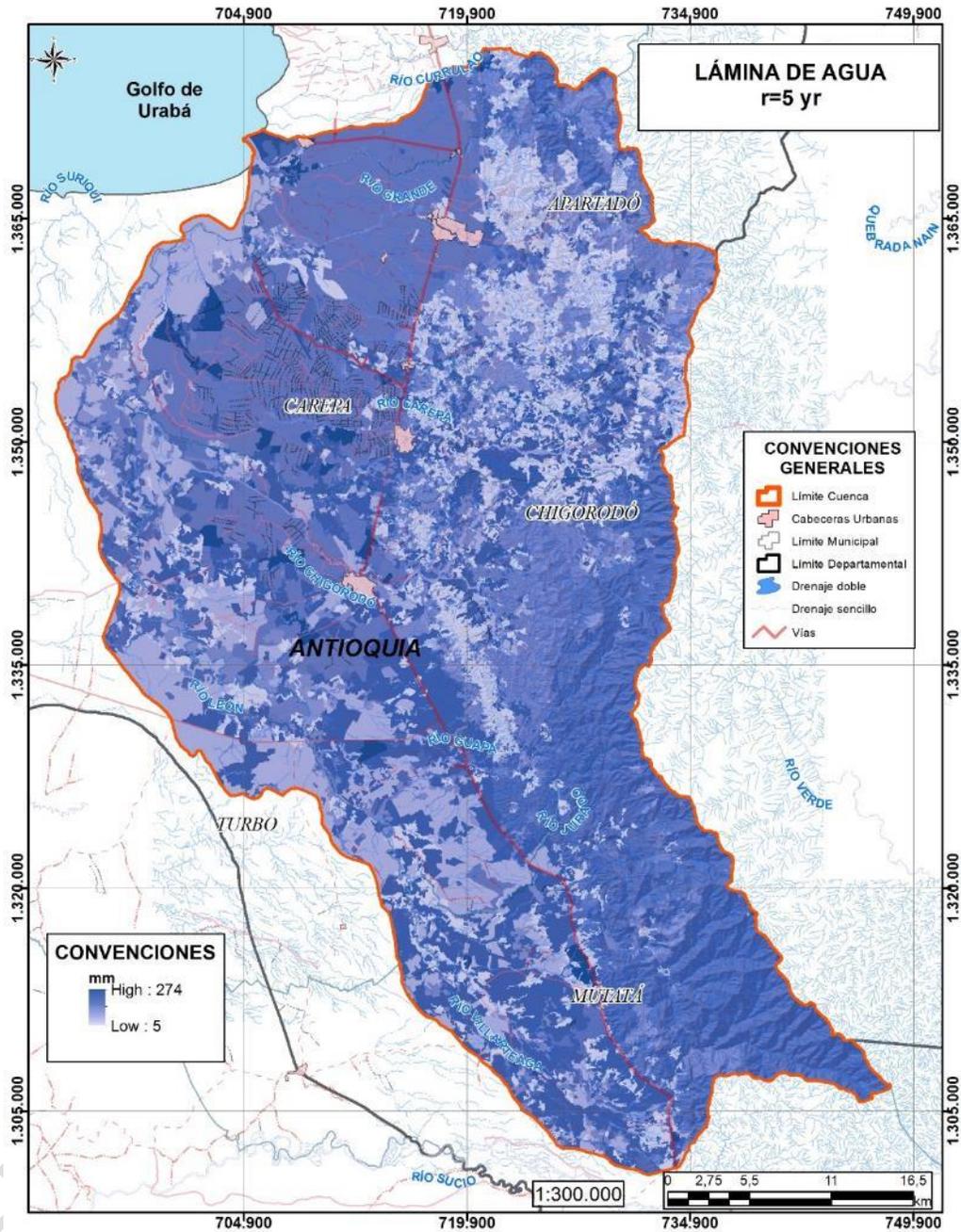
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 31. Altura de la lámina de agua para período de retorno  $t=2yr$



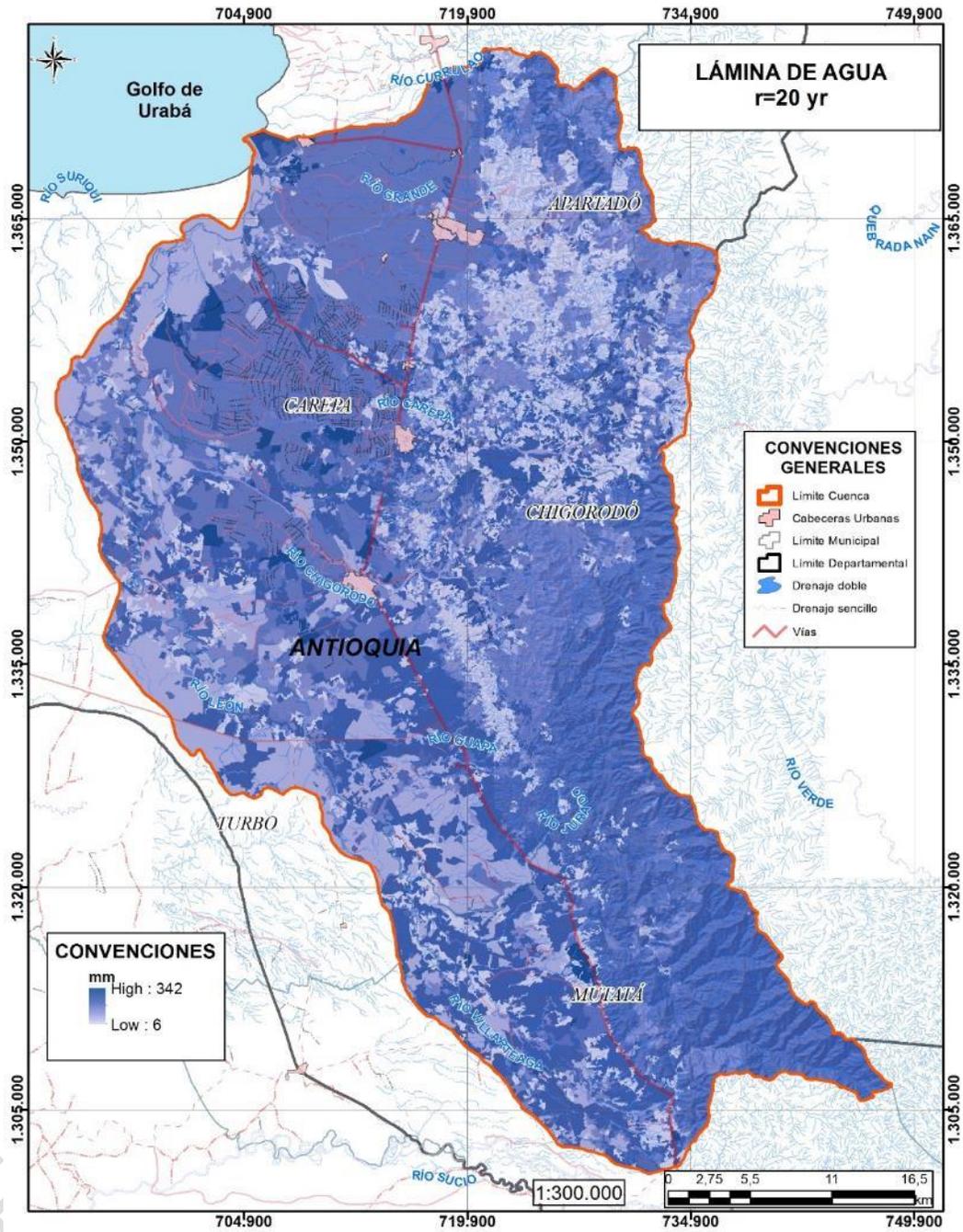
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 32. Altura de la lámina de agua para período de retorno t=5yr



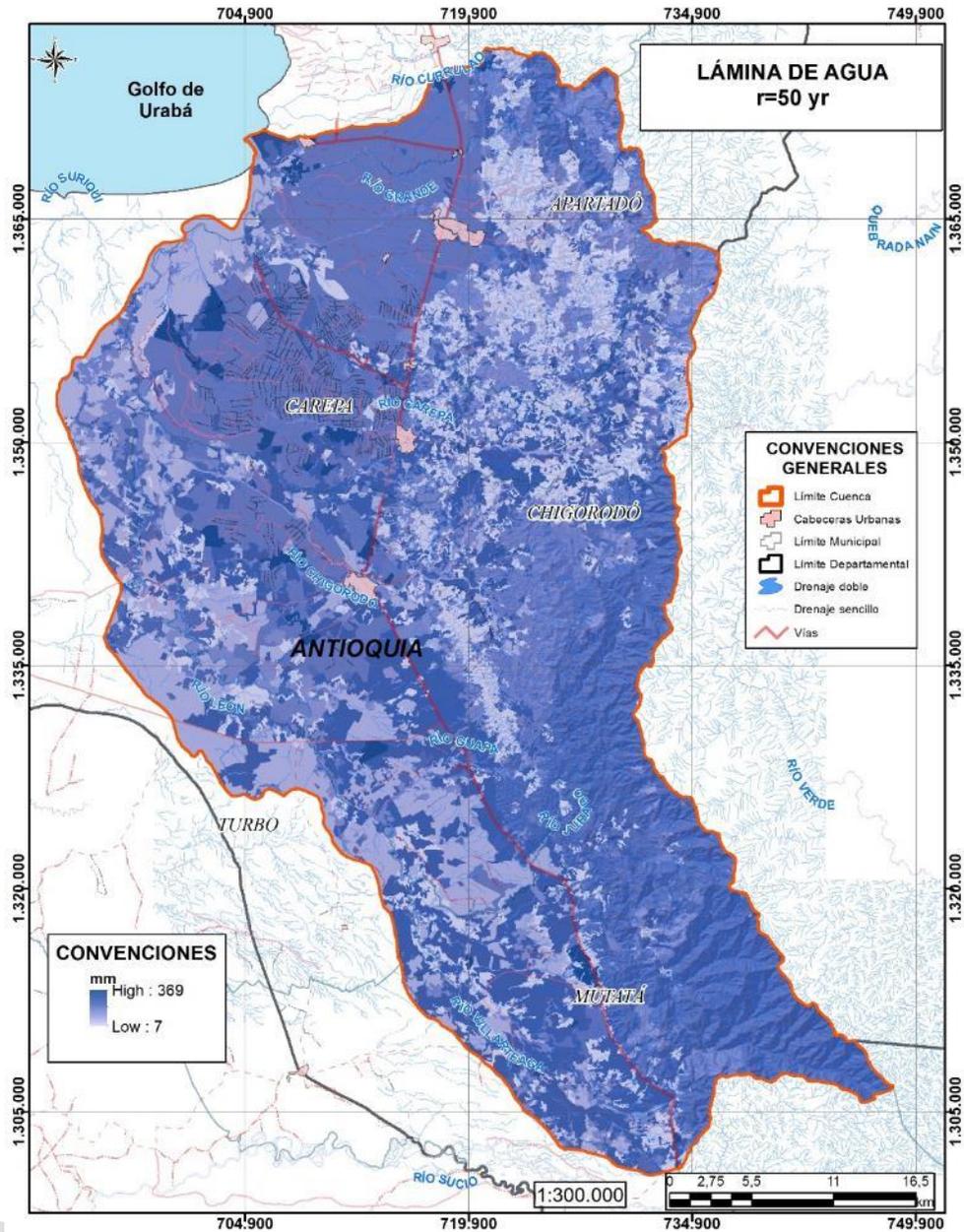
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 33. Altura de la lámina de agua para período de retorno t=20yr



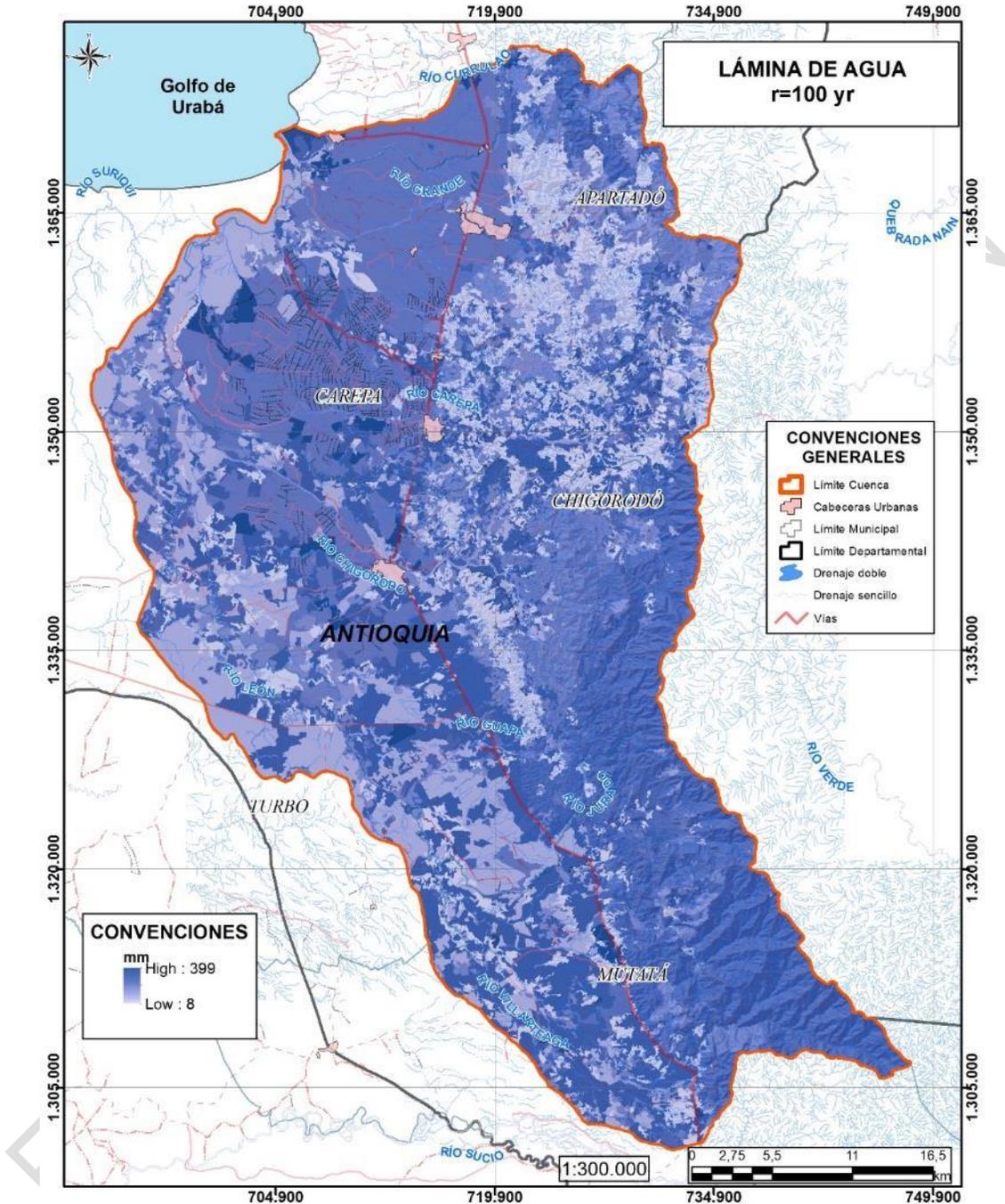
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 34. Altura de la lámina de agua para período de retorno  $t=50yr$



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 35. Altura de la lámina de agua para período de retorno  $t=100yr$



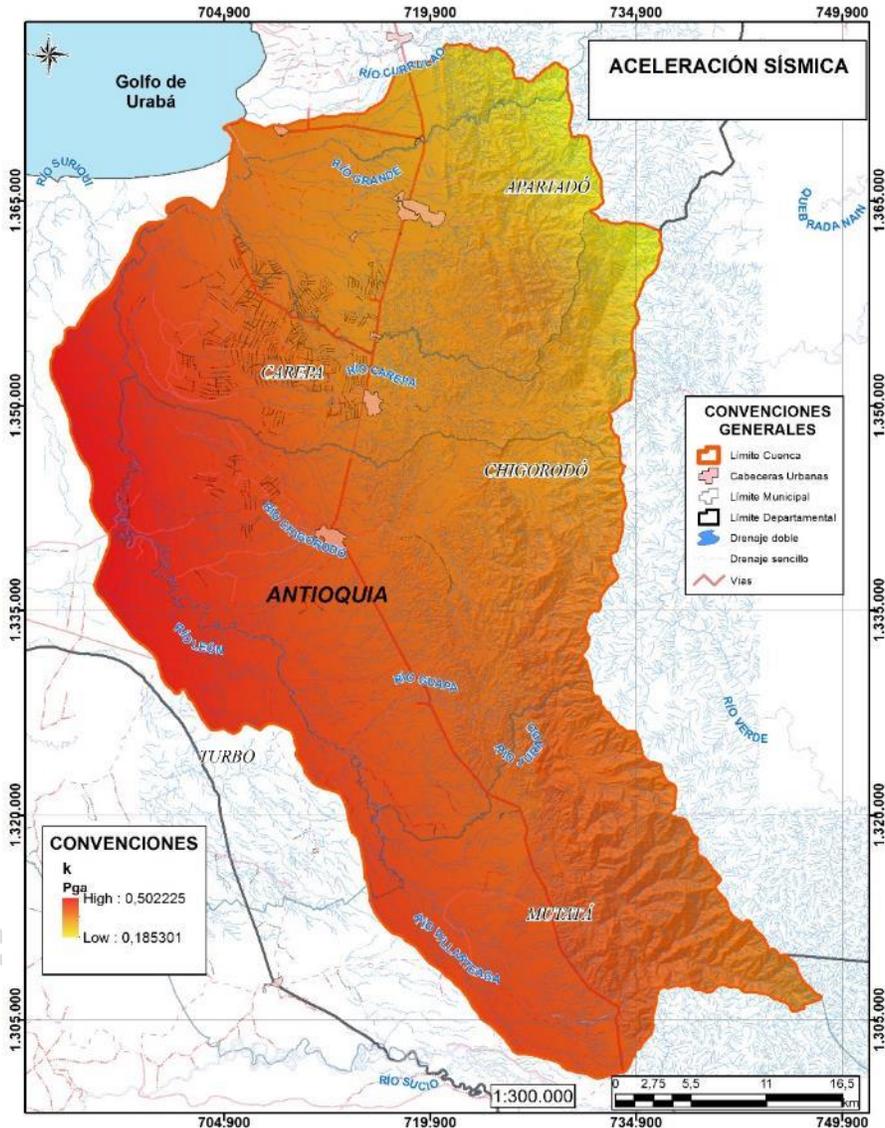
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

### 2.1.5.2 Aceleración sísmica

Generada a partir del mapa de aceleración sísmica de Colombia y corroborada con los coeficientes de aceleración sísmica dados por AIS (2009). Según el Reglamento de Construcción Sismorresistente NSR-10, el coeficiente de aceleración sísmica para el

municipio de Apartadó y lugares aledaños es 0.15, lo que ubica a la cuenca hidrográfica en una zona de baja a media amenaza sísmica. Para este ejercicio, en lugar de emplear un valor único de amenaza sísmica, se estimó considerando los estudios geofísicos de la ANH en el sector, para cada celda la aceleración pico efectiva en superficie de roca a partir del mapa de amenaza y se realizó el cálculo de efecto topográfico al valor de la aceleración sísmica de cada píxel para generar contrastes de amplificación y deamplificación del coeficiente de aceleración sísmica en la zona de estudio en función de la geometría del terreno.

Figura 36. Coeficiente de aceleración sísmica



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Los mayores valores se encuentran hacia la parte nororiente de la cuenca alcanzando valores de 0,40g (404 gales) y menores hacia el costado oeste de la misma con magnitud cercana a 175 gales.

### 2.1.5.3 Parámetros geomecánicos

Contiene polígonos que representan rocas, depósitos y suelos de superficie clasificados según lo propuesto por la IAEG (1981), Montero, González, Ángel (1982) y la “Propuesta metodológica para la cartografía geológica aplicada a geomecánica”, desarrollada dentro del “Proyecto Compilación de la Información Geomecánica”, elaborado por INGEOMINAS (2005).

Cada unidad geológica superficial representada en el modelo geológico geotécnico, el cual se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, contiene los materiales que dan origen a las formaciones superficiales y el suelo que resulta de la degradación o transporte de los mismos. La caracterización geotécnica de cada unidad se detalla desde el punto de vista geológico, geomorfológico, geométrico y geotécnico en el anexo del modelo geológico geotécnico, como soporte a la obtención de los siguientes parámetros geométricos, de densidad y resistencia al corte para un modelo de falla drenada basada en el criterio de Mohr-Coulomb bajo un mecanismo de falla traslacional:

- Ángulo de Fricción ( $\Phi$ ).
- Cohesión (C).
- Peso Unitario (Gamma).
- Profundidad de la interfase o límite roca-suelo.

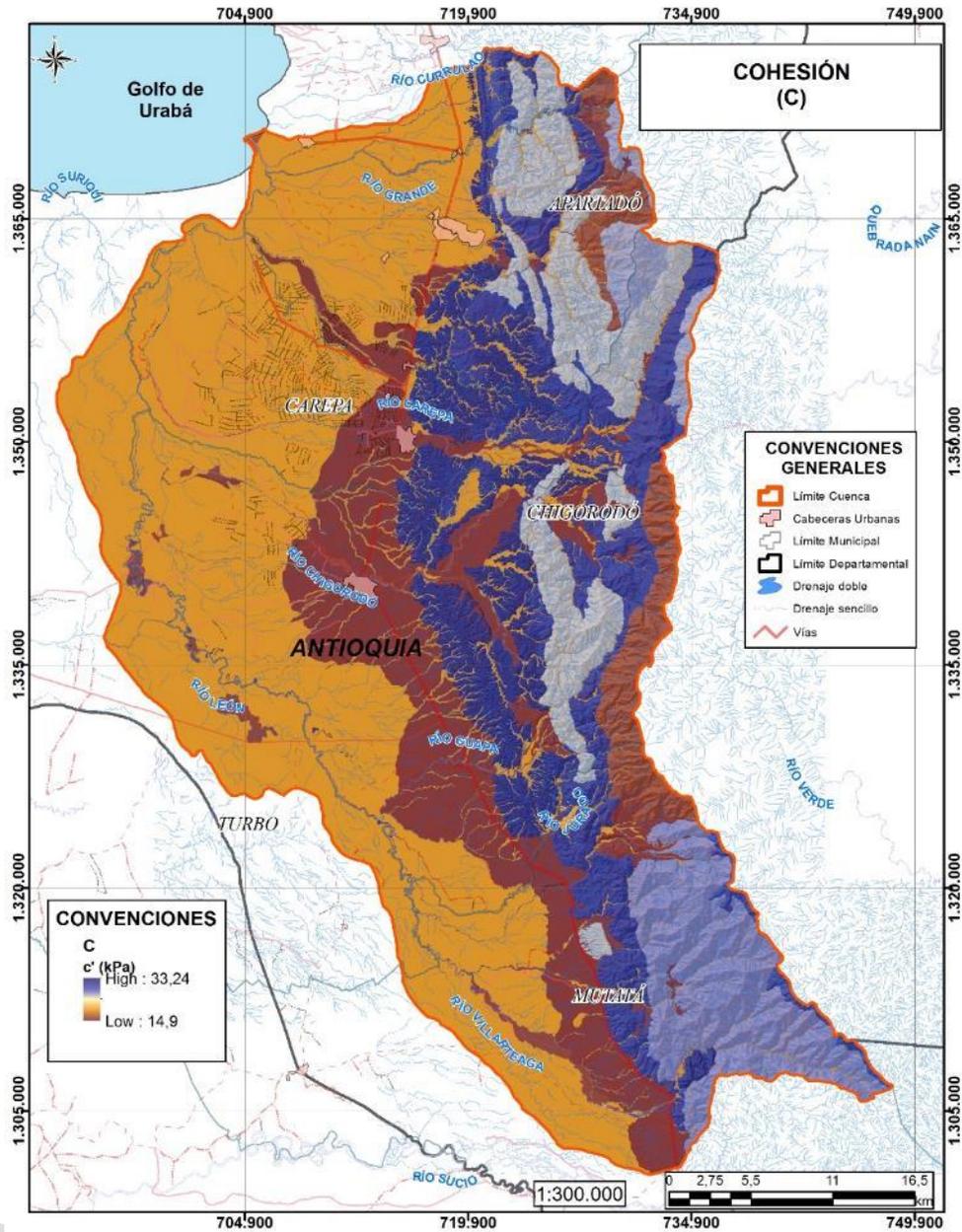
Cada uno de estos atributos se estandariza y procesa para su uso en formato ráster en la ejecución de operaciones entre las capas resultantes. En la Tabla 20 se presentan los parámetros de resistencia al corte para el criterio de falla de Mohr-Coulomb para cada Unidad Geológica Superficial (UGS) en la cuenca hidrográfica. En el anexo 3 “Parámetros geomecánicos” se muestra el anexo geotécnico.

**Tabla 20. Parámetros geomecánicos evaluados por cada zona geotécnica**

UGS Zona Geotécnica	Yt (kN/m <sup>3</sup> ) Gamma	c' (kPa) C	$\phi'$ (grados) Phi	Espesor
Rbcoiad-Srs1	16,76	27,26	24	8,3
Rbcoiaf-Srs1	18,34	25,06	25	9,3
Rdbmad-Srii1	19,58	19,88	23	7,4
Rdbmae-Srii1	18,97	28,48	26	6,4
Rdpavad-Srs1	18,55	16,26	21	9,3
Rdpavae-Srs1	16,39	24,28	27	8,4
Rmbcgad-Sriv1	17,41	27,38	25	7,9
Rmbcomaa-Srs1	16,11	22,46	28	9,3
Rmbcomad-Srs1	16,74	28,44	25	11,2
Rmbcomae-Srs1	18,45	23,66	24	12,3
Rmbcosad-Srs1	17,45	29,54	26	9,7
Rmbcscad-Sriv1	15,98	24,88	22	6,4
Rmbcscae-Sriv1	16,58	33,24	27	4,2
Stc1	14,44	16,46	18	14,3
Stf1	17,01	15,9	29	15
Stf2	16,33	19,06	31	13,3
Stf3	17,27	14,9	32	11,5

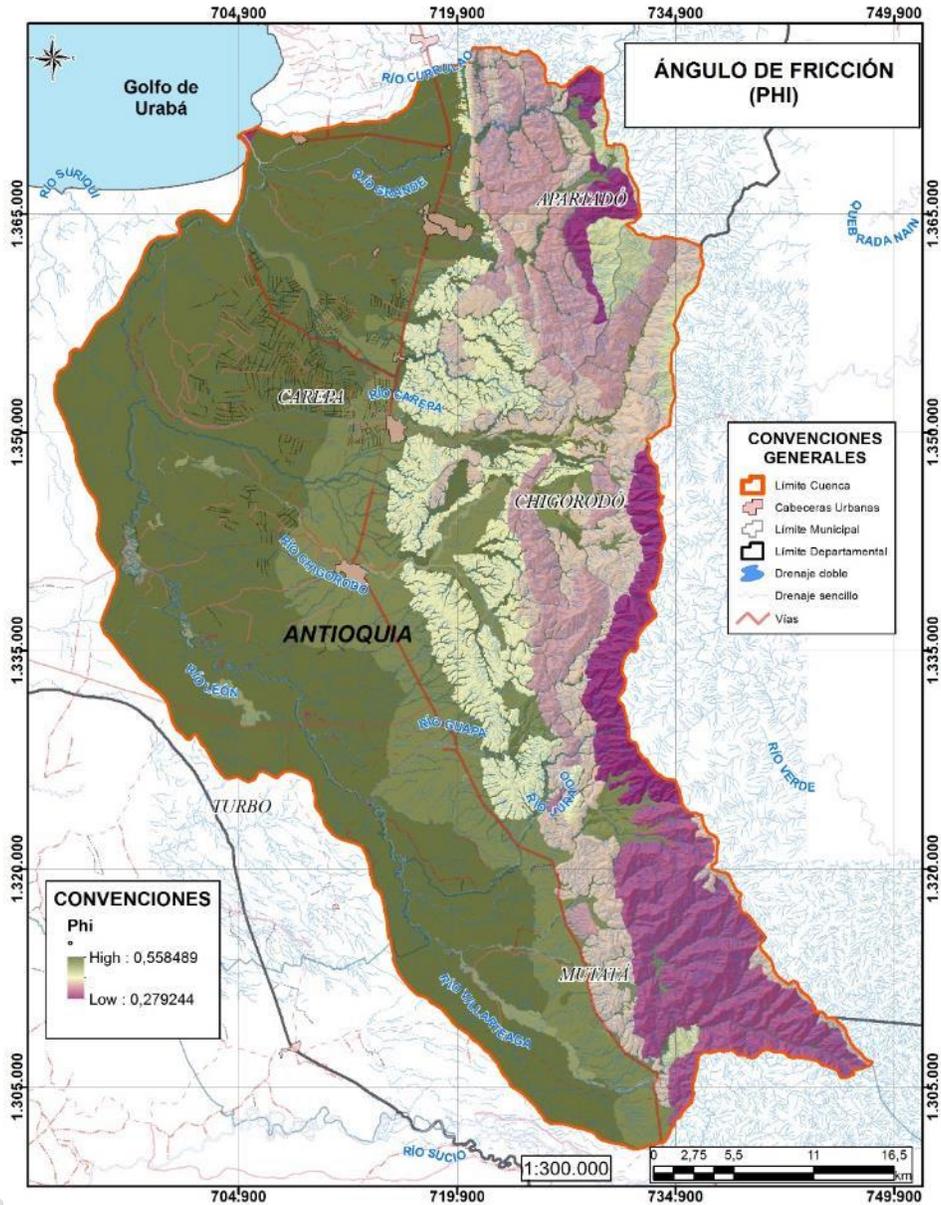


Figura 38. Cohesión



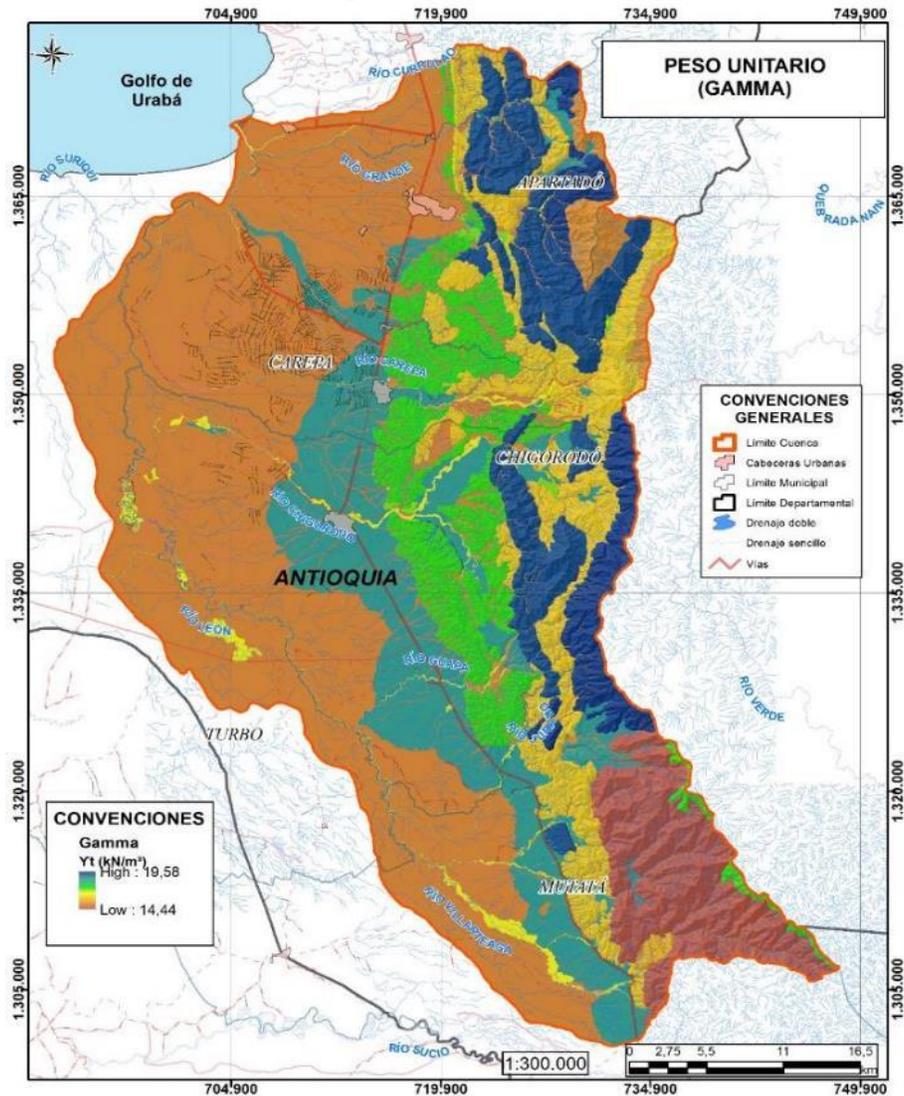
Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 39. Ángulo de Fricción



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Figura 40. Peso unitario

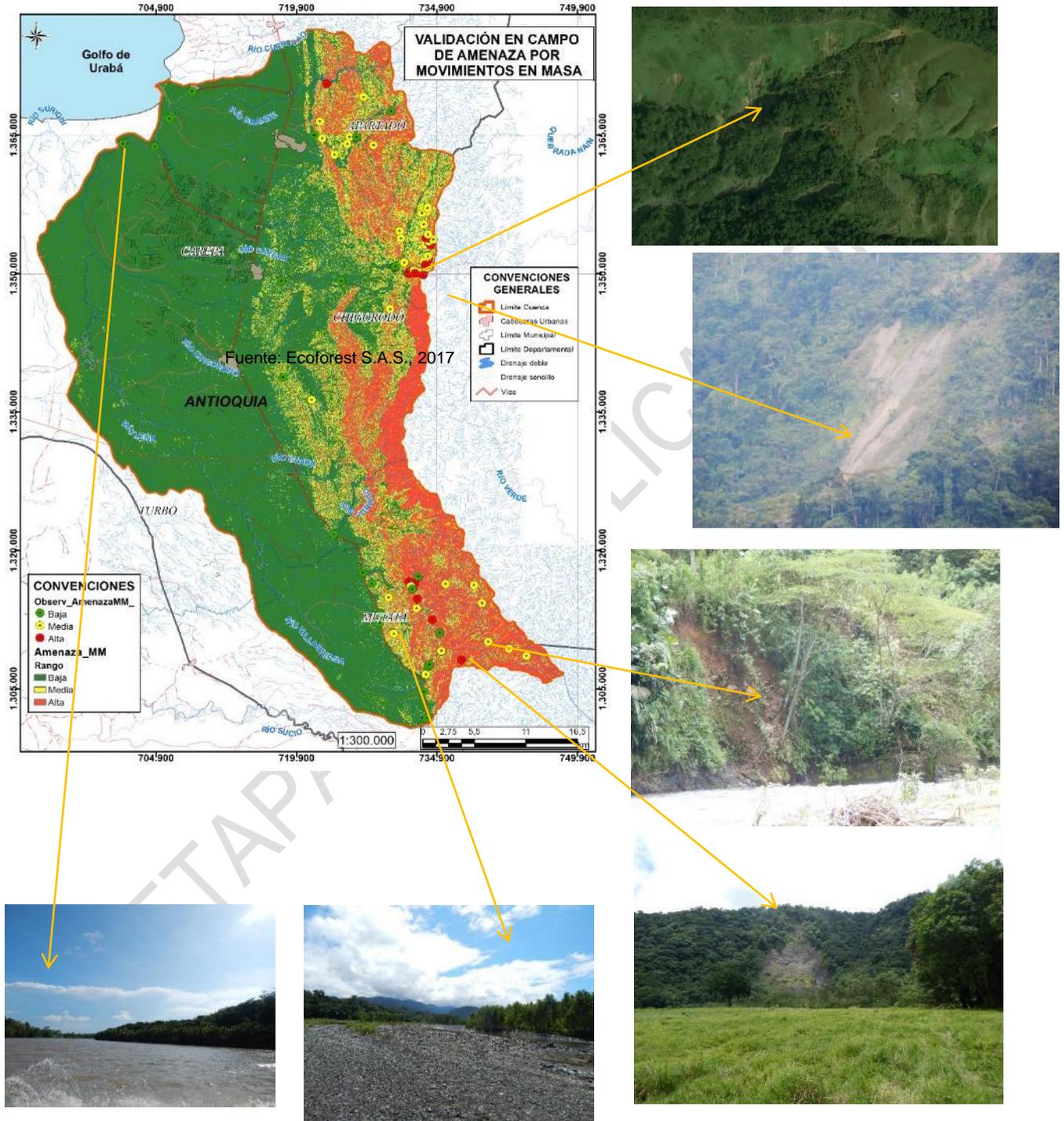


Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

### 2.1.6 Validación en campo de la condición de amenaza por movimientos en masa

Una vez realizada la zonificación de amenaza se llevó a cabo un campo de validación de los resultados buscando verificar las tres zonas de amenaza: alta, media y baja. Se verificaron 121 puntos en tierra distribuidos en la cuenca. 16 de los 121 evaluados no coincidieron en los cuales la amenaza calculada arrojó calificación baja cuando en campo se veía representada al menos una condición media, los demás puntos identificados coincidieron en la existencia o ausencia de amenaza. En la Figura 41 se ilustra la verificación de las condiciones de amenaza encontradas en el territorio en contraste con la zonificación calculada.

Figura 41. Validación en campo de la condición de amenaza por movimientos en masa

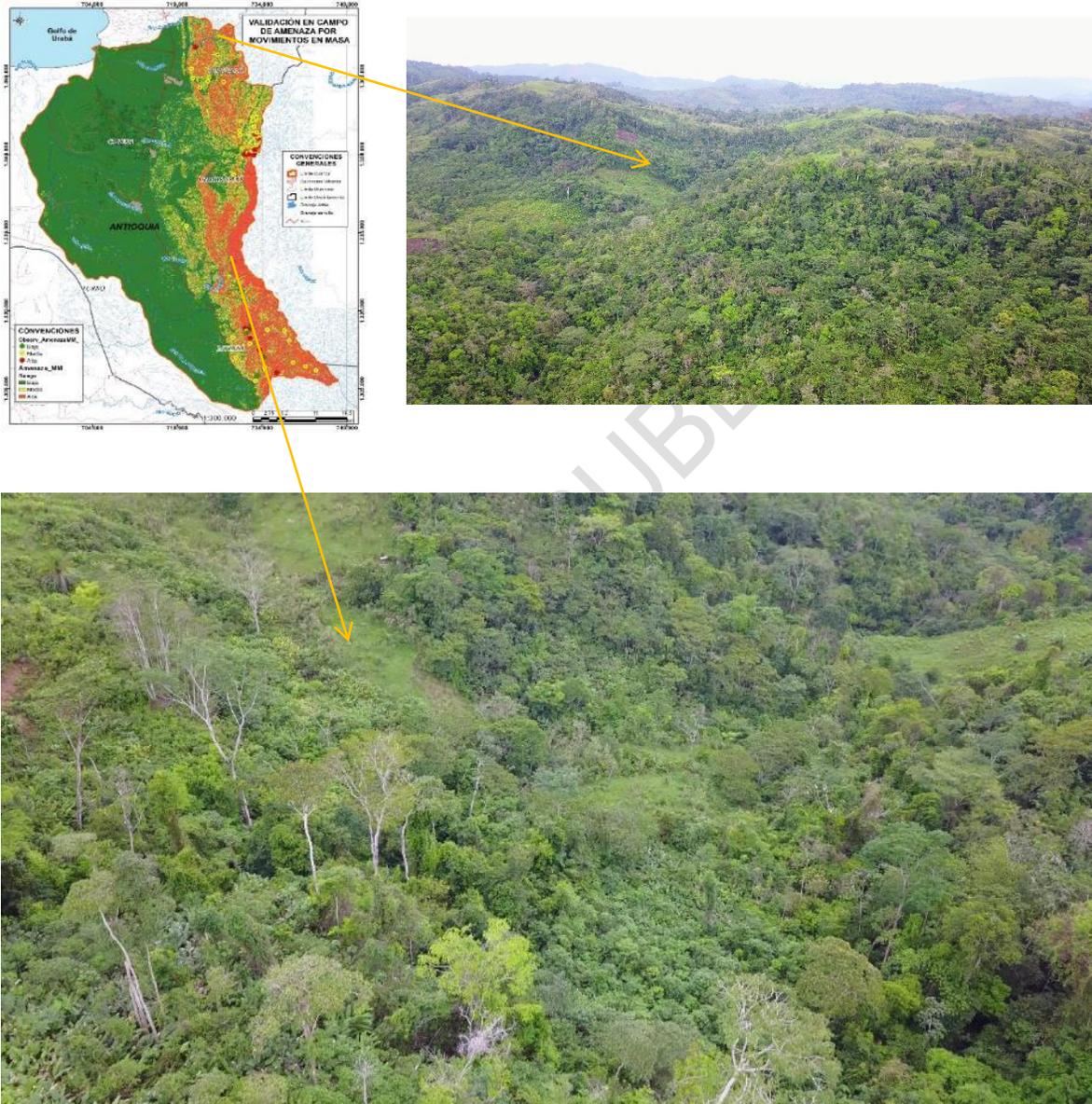


Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

Finalmente se realizó un sobrevuelo con dron y se buscaron las áreas boscosas para verificar su situación de amenaza, los cuales se contrastaron con las ortofotos

suministradas como se muestra en la Figura 42. Una porción importante de las áreas boscosas se encuentran en amenaza media y las partes más orientales que tienen al tiempo mayores pendientes se ubican en amenaza alta, donde incluso se han presentado deslizamientos que se derivan en flujos y avenidas torrenciales.

**Figura 42. Validación en campo de la condición de amenaza por movimientos en masa en zonas sin acceso**



Fuente: Ecoforest S.A.S., 2017

### 2.1.7 Análisis de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa

La zonificación de amenaza se presenta entre valores bajos con proporción alrededor del 74% (163970,71 ha), medios cercanos al 18% (41575 ha) y altos en el resto de la cuenca

con un 8% (14592,1 ha) como se observan en la Figura 43 (Ver Anexo GR/ Amenaza MM). En la parte norte y este de la cuenca se presentan los relieves más abruptos de la cuenca con pendientes relativamente mayores y niveles moderados de espesor de láminas de agua para los casos de saturación parcial de suelos.

La interpretación de cada una de las calificaciones se puede orientar de la siguiente manera:

- Las zonas de amenaza alta corresponden con laderas en las que han ocurrido movimientos en masa o confluyen condiciones que favorecen su ocurrencia como áreas de fallamiento local, meteorización alta a moderada, discontinuidades desfavorables, alta pendiente, erosión hídrica alta y socavación permanente en los márgenes de los cuerpos de agua.
- Las zonas de amenaza media corresponden con laderas donde han ocurrido algunos movimientos en masa y existe la posibilidad de que ocurran pues confluyen algunas de las condiciones que favorecen su ocurrencia como algunas áreas cercanas a fallas locales, presencia de cortes y rellenos en caminos rurales, pendientes moderadas y erosión hídrica moderada o socavación lateral moderada.
- Las zonas de amenaza baja corresponden con laderas en las que no existen indicios que permitan predecir deslizamientos y confluyen pocas condiciones que favorecen su ocurrencia, son áreas con materiales con discontinuidades favorables, ausencia de fallamiento local o erosión hídrica y poca pendiente del terreno.

La zonificación de amenaza presentada es el resultado de la evaluación con método probabilista planteado a partir de la combinación de los escenarios mostrados anteriormente en todas las condiciones posibles de profundidades de superficies de falla y presencia o ausencia de detonantes lluvia y sismo. En los anexos mencionados sobre los escenarios (98 condiciones evaluadas combinadas en 10 escenarios) se presentan los resultados de la evaluación de cada posibilidad. Es evidente que las condiciones de saturación y fuerzas sísmicas actuantes agravan la condición de inestabilidad de las laderas, por lo cual el resultado combinado refleja en parte dicha presencia de detonantes. Si bien las laderas son susceptibles a movimientos en masa, la ocurrencia de estos es selectiva en ciertas zonas que podrían ser específicas dentro de la cuenca.

Al reducir la saturación de los suelos y sin la influencia de eventos sísmicos, lo que corresponde con los escenarios más favorables, la condición de estabilidad es considerablemente mejor en toda la cuenca teniendo la mayoría de la zona de ladera en zona de amenaza baja por movimientos en masa.

A medida que se van incrementando los valores de saturación o si se incluye la acción del sismo, lo que corresponde con escenarios intermedios a favorables, aparecen en los resultados zonas de amenaza media más amplias y muy pocas zonas de amenaza alta.

Finalmente, al aplicar valores altos de saturación y la acción del sismo, resultan zonas de amenaza alta más marcadas y zonas de amenaza media dominando las áreas en las zonas de ladera.



Boulandier, J. J., Esparza, F., Garayoa, J., Orta, C., & Anitua, P. (2001). Manual Extinción de Incendios. Bomberos de Navarra Nafarroako Suhiltzaileak. Pamplona: Bomberos de Navarra.

Butler, B., Anderson, W., & Catchpo, E. (2007). Influence of Slope on Fire Spread Rate. US: Forest Service Proceedings.

DANE. (s.f.). Necesidades Básicas Insatisfechas -NBI-. Recuperado el 2016, de <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-sociales/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>

DECRETO 1420. (Julio de 24 de 1998).

Dirección General de Protección Civil y emergencias - España. (s.f.). [www.proteccioncivil.org](http://www.proteccioncivil.org). Recuperado el 2016, de <http://www.proteccioncivil.org/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm010.htm>

Glade , T., & Crozier, M. (2005). A review of scale dependency in landslide. Chichester: Wiley.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., & Galli, A. M. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 272 -299.

IDEAM. (2016 йил 03-08). IDEAM. From Amenazas de Inundación: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2011). Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000. IDEAM, Bogotá, D. C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). IDEAM. Recuperado el 2016, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/susceptibilidad-de-las-coberturas>.

Luengas, J., Perico, N. (2017). Criterios complementarios para evaluación de amenazas y riesgos en escalas regionales para ordenamiento territorial. Biblioteca GEOTRIE Ciencias e Ingeniería. Bogotá, Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación de manejo de cuencas hidrográficas POMCAS. Bogotá.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014 йил Noviembre). Protocolo para La Incorporación de la Gestión del Riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, F. d. (2014). Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.

Moreno Rodriguez, J. M., Rodriguez-Urbieto, I., Zabala Espiñeira, G., & Martín, M. (2015). Impactos del Cambio Climático en Castilla - La Mancha. Toledo, Toledo: Fundación General de Medio Ambiente.

Parra Lara, A. d. (2011). Incendios de la cobertura vegetal. Cali, Colombia.

Portilla, M. (2001). Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa. Geología Colombiana, v. 26, pp. 189 - 205.

Portilla, M. (2012). Notas de clase de amenaza. En S. N. Minería, Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades andinas, 2007: Movimientos en masa de la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenaza. Bogotá D.C, Colombia: Maestría en Ciencias - geología. UN - Sede Bogotá.

Perico, N. (2017). Caracterización del escenario de riesgo por movimientos en masa en Bogotá. Concepto de revisión de susceptibilidad a movimientos en masa por métodos estadísticos para Bogotá. IDIGER, Bogotá, Colombia.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, págs. 9 - 26.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C.

SGC - SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C. 56 p.

SGC -Servicio Geológico Colombiano. (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C.

Turcotte, D., & Malamud, B. (2000). Cellular - automata models applied to natural hazards. IEEE Computing Science and Engineering, 42 - 51.