

---

## ZONIFICACION A ESCALA GRANDE DE AMENAZAS POR FENOMENOS DE REMOCION EN MASA, EMPLEANDO LA HERRAMIENTA DEL SIG

---

**Beatriz E. Alzate A., Carlos A. Guevara y José A. Valero M.**

---

Geóloga, profesora Universidad Nacional – Geólogo, director técnico IGL  
Ltda – Ingeniero de sistemas profesor Universidad Distrital

### RESUMEN

Los fenómenos de remoción en masa de diversos orígenes son muy frecuentes al sur de la ciudad de Santa Fe de Bogotá, capital de Colombia. Debido a la susceptibilidad de la población, la economía e infraestructura, se hace necesario identificarlos, evaluarlos y cartografiarlos.

El presente artículo muestra un método para la zonificación a gran escala de amenazas por fenómenos de remoción en masa en un área de la ciudad de Santa Fe de Bogotá. Este método es útil para la generación de productos que sirvan de base para la toma de decisiones por parte de planificadores, encargados de presentar soluciones a los problemas de desarrollo urbano, que permitan una calidad de vida adecuada para la población que habita en estas zonas.

El estudio en el que fue desarrollada el método de zonificación de amenaza a escala grande, que a continuación se presenta, fue contratado por la dirección de prevención y atención de emergencias del Distrito Capital, con el fin de tomar una decisión en relación con el riesgo que presentan las familias de la localidad de Usme a sufrir daños debido a la ocurrencia de los fenómenos de inestabilidad.

El presente trabajo empleó el módulo GRID de ARC/INFO. El SIG soportó todo el proceso de modelamiento incluyendo la interpolación espacial de variables de entrada y la generación del mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa, de acuerdo con un modelo conceptualizado para tal fin. La herramienta del SIG fue empleada para realizar el análisis espacial, a través de diversas operaciones y técnicas de procesamiento de variables que inciden en los fenómenos de inestabilidad y cuya alteración equilibrio o relación entre si define los diversos grados de susceptibilidad a la ocurrencia de estos fenómenos.

## INTRODUCCIÓN

En la localidad de Usme de Santa Fe de Bogotá se encuentra asentada alguna población, en zonas inestables. Debido a los numerosos problemas sociales del país, esta población ha sido marginada a dichas zonas, las cuales se han convertido en una amenaza constante para su seguridad y desarrollo normal.

El desarrollo urbanístico en el sector, sin la dirección técnica adecuada, conlleva a que el factor de seguridad de los taludes naturales se vea disminuido, originando problemas de inestabilidad.

Esta población carece de servicios básicos, lo cual agrava su condición, disminuyendo la calidad de vida y aumentando su vulnerabilidad ante los fenómenos amenazantes. El identificar, evaluar y localizar los movimientos en masa es una prioridad, con la que se puede adoptar una solución a su problema de calidad de vida.

Debido a que el estudio de la amenaza de estos fenómenos posee un carácter multicriterio (evaluación de varios criterios que inciden de manera diferente en el desencadenamiento del fenómeno), es necesario emplear herramientas que permitan modelar la realidad del mundo, proporcionando facilidades para la prueba de diversos escenarios que reflejan las relaciones espaciales

de los elementos de este mundo real, representados a través de mapas. Una de estas herramientas es el SIG, la cual fue empleada en el presente trabajo, donde se evaluó su desempeño y potencial.

El carácter multicriterio de los fenómenos de inestabilidad está dado por la presencia de los factores de susceptibilidad intrínseca y factores detonantes, además de las diversas probabilidades de que, bajo diferentes condiciones, se produzca el fenómeno.

Para realizar la zonificación de la amenaza fue empleado un método semi-cuantitativo, el cual integró las variables que inciden en el desencadenamiento de los fenómenos de inestabilidad. Este método tiene la facilidad de representar las características del área de estudio a través de celdas. Cada una de estas celdas constituye la unidad de trabajo, que proporciona un gran detalle. La integración de las variables se efectuó con el fin de calcular la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de inestabilidad, en una área dada, lo que significa la falla del talud, debido a la disminución del factor de seguridad.

Algunas decisiones para la solución del problema planteado arriba, podrán adoptarse con base en la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa, generada en el presente trabajo, la

Cuadro No. 1 Variables empleadas en la espacialización de la amenaza

SUSCEPTIBILIDAD INTRINSECA	
PARAMETROS	ASPECTOS A EVALUAR
PENDIENTE TRANSVERSAL	- Rangos.
TIPO DE MATERIAL	- Litología. - Características geotécnicas. - Condición Estructural.
GRADO INFILTRACION	- Porosidad y permeabilidad de los diferentes materiales. - Distribución de la precipitación en el área. - Permisibilidad del tipo de cobertura a la infiltración. - Pendiente del terreno.
BUZAMIENTO Vs TOPOGRAFIA	- Dirección de la inclinación de las capas y laderas. - Grado de inclinación de las capas y laderas.
TIPO DE LADERAS	- Origen y Evolución. - Perfil longitudinal de las laderas.
DETONANTES	
PARAMETROS	ASPECTOS A EVALUAR
SISMICIDAD	- Aceleración horizontal. - Tipo de roca. - Aspectos topográficos (amplificación local)
USO Y COBERTURA VEGETAL	- Protección de las laderas. - Efectos negativos por sobrepeso. - <i>Efectos de la urbanización.</i>
PRECIPITACION	- Precipitación máxima en 24 horas. - Periodo de retorno. - Relación lluvia-deslizamiento.

cuál permitirá diferenciar los sectores con una probabilidad alta de ocurrencia de estos fenómenos, donde será necesario adoptar medidas de mitigación y prevención que favorezcan a la población y permitan mejorar su calidad de vida.

### ADQUISICIÓN DE DATOS

El modelo de amenaza desarrollado considera la susceptibilidad intrínseca de los factores que inciden en la inestabilidad y los factores detonantes que aceleran su desencadenamiento. Una vez reconocida el área de estudio y analizados algunos de los fenómenos de ocurrencia actual, fueron determinadas las variables a

ser consideradas dentro del modelo de zonificación de la amenaza. Estas variables son las que se presentan a continuación.

Para cada variable fue elaborada una o varias coberturas (mapas que representan espacialmente y a través de elementos geométricos los rasgos del mundo real), en las cuales fueron plasmados los aspectos evaluados. Algunas de estas coberturas son de primer nivel o mapas de entrada al SIG, otras son intermedias y obtenidas a partir del análisis espacial conducido con funciones del software SIG ARC/INFO.

Después de haber evaluado la información existente, especialmente la parte correspondiente a la

cartografía, se complementó la información altimétrica existente a escala 1:5.000, que fue importante para generar el Modelo Digital del Terreno (MDT).

El siguiente punto importante fue interpretar fotografías aéreas a escala grande de tres fechas diferentes, una de ellas de fecha actual, cuyo propósito fue el de realizar un análisis temporal de los procesos geomorfológicos y antrópicos actuantes en el área.

A partir de la fotointerpretación temática se generaron los siguientes mapas preliminares: Geológico, Geomorfológico, Geotécnico, de Cobertura Vegetal y de Actividad Antrópica. Con estos mapas se planificó el trabajo de campo y se verificó la interpretación, realizando los ajustes necesarios a la cartografía temática.

El levantamiento geológico y geomorfológico se realizó con el detalle necesario para poder formarse un criterio real de las condiciones físicas del macizo rocoso. Los aspectos evaluados fueron, entre otros, la actividad tectónica Pre-Fórmación Usme, el ambiente de depositación y el tipo de estructuras desarrolladas. Lo anterior marca el comportamiento geomecánico de las diferentes litologías y por consiguiente la susceptibilidad a la inestabilidad.

## **ANÁLISIS ESPACIAL DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA**

### **Proceso de la modelación de los fenómenos de amenaza**

De acuerdo con las características físico - químicas, mecánicas, topográficas, de cobertura, de uso y de actividad antrópica de la localidad de Usme, el análisis de la amenaza por remoción en masa se desarrolló a través de los siguientes pasos:

- Cálculo del Factor de Seguridad (FS) para toda el área.
- Ajuste del factor de seguridad con el mapa de cobertura.
- Ajuste del factor de seguridad con el mapa de laderas y condiciones estructurales
- Generación del mapa de amenaza en función de probabilidades, teniendo en cuenta la afectación del material debido a la ocurrencia de sismos y al cambio del volumen de infiltración de aguas en los taludes (agentes detonantes).
- Validación y calibración de la amenaza con las áreas dinámicas por procesos naturales y antrópicos existentes.
- Determinación de incertidumbres en la producción del mapa de amenaza

### **Análisis de la amenaza empleando la herramienta del SIG**

El análisis de la amenaza se efectuó mediante el empleo de operadores y de técnicas de análisis de datos espaciales como los de superficie, superposición, radios de influencia, distancias, vecindad, análisis estadístico, reclasificaciones, búsquedas booleanas y álgebra de mapas.

El análisis de datos fue realizado modelando el mundo real en cuanto a las relaciones espaciales que existían entre las variables de susceptibilidad intrínseca y entre estas últimas y las detonantes. Dependiendo de estas relaciones, las cuales en la mayoría de los casos estaban representadas por una fórmula, fue empleada una operación o técnica diferente.

Durante el desarrollo del trabajo no se perdió de vista que las herramientas de análisis como el SIG son eso, solo "herramientas" a través de las cuales podemos realizar operaciones entre capas, cuyo verdadero análisis e interpretación fueron realizados por los temáticos, quienes se valieron de los resultados para tomar finalmente las decisiones. En otras palabras el SIG no pensó por el temático. Fue el temático quien pensó ayudado por la herramienta.

En el presente trabajo el SIG demostró una de sus mayores fortalezas al permitir analizar espacialmente los datos que fueron almacenados y estructurados con el fin de ser procesados integralmente, permitiendo resolver el objetivo trazado.

La escala de trabajo fue un aspecto de gran relevancia considerado. Todos los datos producidos y los adquiridos, se buscó que dieran el nivel de detalle de una escala 1: 10000, lo cual garantizó la homogeneidad en la representación de diferentes características que dieron origen a las entradas producidas para modelar los fenómenos en el SIG. Ya dentro del SIG, estos datos fueron representados a través de la unidad de trabajo adoptada para representar los datos con una estructura RASTER o GRID. Esta unidad fue la celda con dimensiones de 10m X 10m., formato al cual fueron llevadas todas las coberturas que participaron en el análisis de la amenaza.

La herramienta del SIG es de gran soporte cuando se realizan zonificaciones, como fue el caso del presente trabajo. Lo anterior se explica con el hecho de que una zona generada representa la confluencia de varios factores (para nuestro caso factores de susceptibilidad intrínseca y detonantes), los cuales se relacionan de alguna forma o simplemente

confluyen en equilibrio o alterados por causas externas e internas. El formato raster o grid permite analizar estos aspectos empleando unidades de análisis que satisfacen escalas de trabajo muy detalladas, además de facilitar el desarrollo de operaciones y técnicas de análisis que empleando este formato se realizan en forma más fácil. La capacidad de clasificación y generalización de datos sobre un área específica, hacen del SIG una herramienta necesaria para aplicaciones de este tipo, que requieran diferenciar zonas homogéneas.

**Criterios teóricos básicos de análisis**

Dentro del análisis realizado se consideró que la susceptibilidad intrínseca de los taludes naturales a los fenómenos de inestabilidad se cuantifica con el factor de seguridad el cual tiene en cuenta las fuerzas resistentes al corte y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla. Entre menor sea el factor de seguridad mayor será la susceptibilidad a los fenómenos de inestabilidad del talud analizado.

Un análisis de estabilidad implica básicamente hacer un estimativo del modelo de falla y de la resistencia al corte. El modelo de falla requerirá predicción de los pesos (o cargas) que serán resistidos y el efecto del agua. El estimativo del agua requiere consideración de

las fuerzas de filtración y pesos unitarios saturados y efectivos. La forma del modelo de falla suele ser definida aproximadamente. Para el área de estudio se asumió la interfaz depósito de ladera - roca como plano de falla, teniendo en cuenta el poco espesor y las propiedades geomecánicas de éstos.

Considerando lo expuesto anteriormente fue empleada la fórmula para el modelo de pendiente infinita de Graham (1984) en el cálculo del factor de seguridad:

$$F.S_1 = \frac{C' + (\gamma - m\gamma_w) Z \text{Cos}^2\beta \text{Tan}\phi}{\gamma Z \text{Sen}\beta \text{Cos}\beta} \quad (1)$$

Donde:

C' = Cohesión.

Z = profundidad de la falla.

$\gamma$  = peso unitario del suelo.

$\beta$  = pendiente del terreno.

$\gamma_w$  = Peso unitario del agua.

$Z_w$  = profundidad de la tabla de agua sobre la superficie de falla.

$\phi$  = Angulo de fricción.

$m = Z_w / Z$  (relación entre tabla de agua sobre la superficie de falla y la profundidad de falla)

Como la formula utilizada para el Factor de Seguridad no contempla aspectos como la incidencia de la cobertura y el uso del suelo en la protección de taludes, los tipos de laderas y las condiciones estructurales del sector, se consideró que la existencia o no de estos aspectos podrían influir

notablemente en las condiciones de estabilidad de las laderas. Para evaluar esta premisa se diseñó una relación entre el Factor de Seguridad calculado y los diferentes tipos de uso y cobertura vegetal. La ecuación que se tomó para ajustar este valor fue:

$$FSCv = F.S1 \times A \times B \quad (2)$$

FSCv = Factor de seguridad considerando la cobertura, tipo de laderas y condiciones estructurales.

F.S1 = Factor de Seguridad sin considerar la cobertura, tipo de laderas y condiciones estructurales.

A = Factor de ajuste según el tipo de uso y cobertura del suelo y la pendiente.

B = Factor de ajuste según el tipo de laderas y las condiciones estructurales

La amenaza está definida como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno dado, en un área determinada. Esta probabilidad se calcula con base en la recurrencia de detonantes como la lluvia y los sismos. Para el presente trabajo fue empleada una fórmula (Van Westen 1993:175), la cual permitió calcular el factor de seguridad con base en el período de recurrencia de lluvia y sismicidad.

Donde:

C' = Cohesión.

Z = profundidad de la falla.

$\gamma$  = peso unitario del suelo.

$\delta$  = gravedad específica.

$\beta$  = pendiente del terreno.

$\gamma_w$  = Peso unitario del agua.

Zw = profundidad de la tabla de agua.

$\phi$  = Angulo de fricción.

Ah = Aceleración horizontal.

### Modelo Cartográfico de procedimientos SIG

Con base en los criterios arriba planteados fue adoptado un modelo cartográfico para llevar a cabo el análisis de la amenaza. Este se muestra en la figura No. 1.

### DESARROLLO DEL MODELO DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA EMPLEANDO EL SIG

Este modelo fue desarrollado en el módulo GRID del SIG ARC/INFO. Por el hecho de emplear una estructura de datos Raster, fue posible obtener los parámetros de inestabilidad con una resolución de celda de 10 m., lo cual

$$F.S_{AD} = \frac{C' - (Z\gamma \cos^2\beta - Z\delta Ah \cos\beta \sin\beta - \gamma_w Z_w \cos^2\beta)\tan\phi}{Z\gamma \sin\beta \cos\beta + Z\delta Ah \cos^2\beta} \quad (3)$$

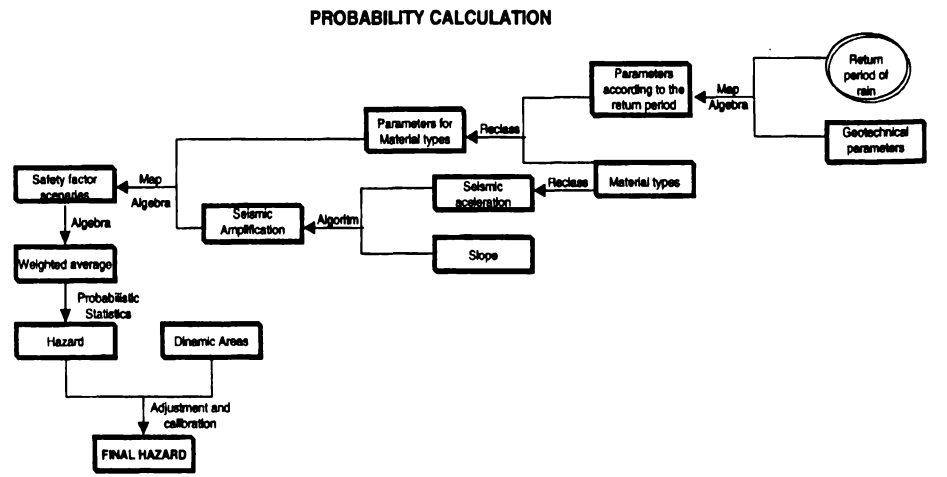
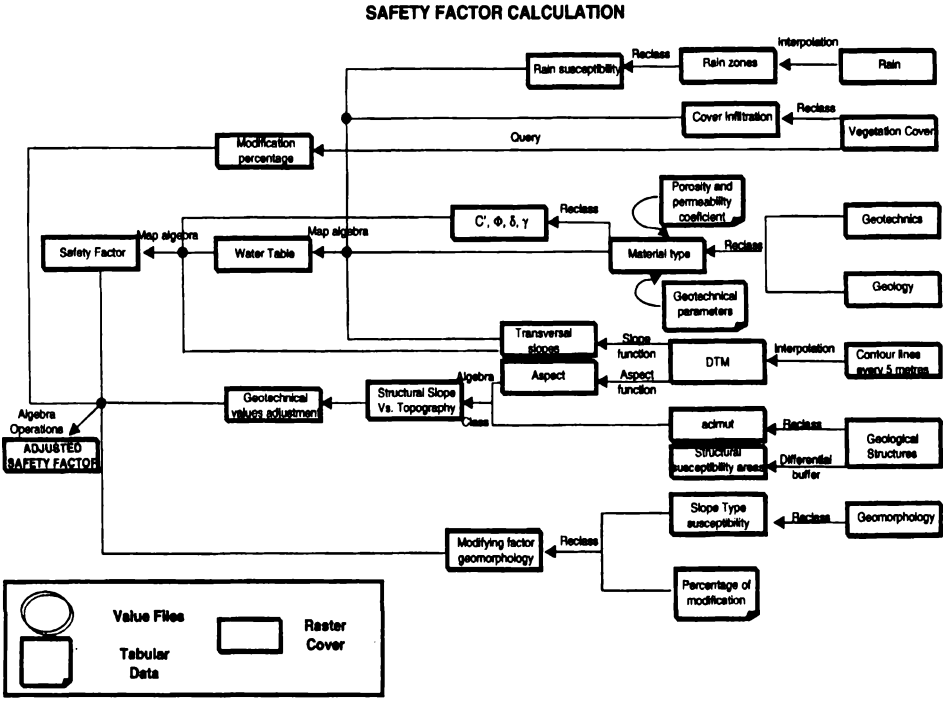


Figura 1. Modelo Cartográfico de procedimientos SIG.



proporciona un gran detalle y permite estudiar el área a una escala grande. Cada operación y técnica aplicada en el desarrollo del modelo de la amenaza respondió a un detalle en campo, equivalente a esta resolución de celda.

**Cálculo del Factor de Seguridad (FS) para toda el área:**

Dentro del proceso del cálculo del factor de seguridad se utilizó el SIG para espacializar los valores matemáticos de las diferentes unidades, así como para el cruce de los mapas lógicos, con base en la ponderación dada para cada parámetro utilizado.

El análisis espacial efectuado para hallar cada parámetro se presentó en el modelo cartográfico (figura No. 1).

1. Cálculo de los parámetros de cohesión (C), peso unitario del suelo ( $\gamma$ ), ángulo de fricción ( $\phi$ ): fueron calculados basados en la cobertura de tipo de materiales. El comportamiento de los materiales frente a los agentes naturales y antrópicos es un parámetro esencial en el análisis de la estabilidad de taludes. Para generar este mapa se tuvieron en cuenta las características litológicas y se utilizó la cobertura del comportamiento geomecánico de los macizos y

los depósitos. Los parámetros se asignaron a cada unidad del mapa de tipo de materiales con base en los análisis de muestras de campo y bibliografía.

2. Cálculo de la tabla de agua: La ecuación empírica utilizada para determinar la tabla de agua en condiciones normales del área, establece una correlación de los diferentes factores que influyen en el proceso de infiltración de las aguas lluvias:

$$\text{Nivel del agua máxima (cm) para cada celda} = \frac{1}{(3R + P + 2A) + V} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

R = Capacidad de carga y descarga de las rocas (Porosidad y Permeabilidad).

P = Valor de la Precipitación.

A = Pendiente del terreno.

V = Uso del suelo y cobertura vegetal

La porosidad y la permeabilidad fue calculada asignando a los diversos tipos de materiales valores correspondientes a muestras tomadas en campo y de la bibliografía existente

3. Profundidad de la falla: Se calculó considerando la existencia en el área de estudio de fenómenos de traslación en el contacto o interfaz suelo – roca. Con base en esta premisa

**Cuadro No. 2 Valores de ajuste para el factor de seguridad según la protección del talud.**

UNIDADES DE USO Y COBERTURA DEL SUELO	SIMBOLO	RANGOS DE PENDIENTE			
		0-15	15-35	35-45	>45
BOSQUE PLANTADO.	Bp	1.1	1.05	0.92	0.90
BOSQUE SECUNDARIO.	Bs	1.1	1.05	1.03	1.02
RASTROJO ALTO.	Ra	1.07	1.03	0.96	0.94
RASTROJO BAJO.	Rb	1.05	1.04	1.07	1.07
RASTROJO BAJO - PASTOS.	Rb/P	1.04	1.03	1.06	1.06
PASTOS - CULTIVOS.	C/P	1.01	1.02	1.06	1.08
CULTIVOS LIMPIOS.	C	0.98	0.95	0.9	0.86
AREAS SIN VEGETACION.	Sv	1	1	1	1
AREAS URBANAS PAVIMENTADA.	Zup	1.1	1.2	1.3	1.4
AREAS URBANAS SIN PAVIMENTAR.	Zusp	0.99	0.95	0.90	0.85

se elaboró un mapa de espesores de los depósitos, el cual se asimiló a la profundidad de la posible zona de falla.

4. Pendiente: Se calculó a partir de las curvas de nivel cada 5 m. del área de interés. Para ello fueron interpolados los valores de altura en toda el área y posteriormente aplicada una función de pendiente.

**Ajuste del factor de seguridad con el mapa de cobertura:**

En el caso concreto de la cobertura (vegetación y uso) fue considerado su tipo y la pendiente en la que se encontraba. Se crearon valores de ajuste con base en el criterio de protección de taludes. El cuadro No.2 muestra estos valores para los diversos tipos de uso y cobertura en la zona de estudio.

**Ajuste del factor de seguridad con el mapa de tipo de laderas y condiciones estructurales:**

En este caso los valores de ajuste para el factor de seguridad se basaron en los criterios de que las actuales formas del relieve son el

resultado de diferentes procesos internos y externos. Antiguas formas de relieve son remodeladas por nuevos procesos, dejando indicios de los anteriores procesos, lo cual permite visualizar la evolución geomorfológica del área. En la zona ocupada por la Localidad de Usme los procesos geomorfológicos de mayor incidencia han sido los de origen estructural. Sobre esta morfología que es la más antigua en el sector se ha venido desarrollando un paisaje de carácter denudativo regional con geoformas localmente de acumulación. Esta combinación de paisajes le confiere al área de estudio una heterogeneidad en el comportamiento de las laderas frente a los agentes originadores de fenómenos de remoción en masa. La disposición de materiales transportados sin consolidar sobre rocas antiguas y en diversos grados de inclinación de taludes naturales guardan por sus características un equilibrio relativo que puede ser fácilmente perturbado por la acción del hombre o por fenómenos naturales.

**Cuadro No. 3 Valores para el ajuste del FS según tipos de laderas**

ORIGEN	LADERAS	SIMBOLO	FACTOR
ESTRUCTURAL	LADERAS ESTRUCTURALES < 100 %	Eb	0.19
	FRENTES ESTRUCTURALES	Ef	1
	ESPINAZOS ESTRUCTURALES.	Ee	1
FLUVIAL	TERRAZAS.	Ft	1
MIXTO	LADERA PLANA.	Mlp	1
	LADERA ALOMADA.	Mla	0.90
	LADERAS CONCAVAS.	Mlc	0.90
	LADERAS CONVEXAS.	Mlx	0.75
	LADERAS PLANO CONVEXAS.	Mls	1
DENUDATIVO	TALUDES DE TERRAZAS.	Dtt	0.80
	LADERAS DE LOS DRENAJES.	Dld	0.90
	LADERAS ONDULADAS.	Dlo	1
ANTROPICO	LADERA DE EXPLOTACION.	Ale	0.75
	LADERA DE RELLENOS.	Alr	0.75
	TALUDES DE OBRAS CIVILES > 45.	Ata	0.80
	TALUDES DE OBRAS CIVILES <45.	Atb	0.90
	TALUDES DE VIAS.	At	0.8

También del mapa geomorfológico se extrajo la información pertinente a las formas del relieve según el origen y la forma de las laderas que se han desarrollado (plana, cóncava, convexa). Es así que las diferentes geoformas presentes en el área se agruparon de acuerdo con su génesis en 5 grupos: Estructural, fluvial, mixto (fluvio - glaciar), denudativo y antrópico (Ver cuadro No. 3).

Para los diversos grados de amenaza se establecieron rangos del factor de seguridad bajo condiciones actuales (sin considerar ocurrencia de factores detonantes), los cuales agruparon zonas homogéneas de estabilidad (Ver cuadro No. 4).

**Generación del mapa de amenaza en función de probabilidades:**

Generado el mapa del FS bajo condiciones actuales, se calculó

nuevamente el FS para diferentes escenarios donde intervinieron dos factores disparadores importantes: los períodos de retorno de la precipitación y de los sismos.

**Cuadro No. 4 Grados de estabilidad según rangos del factor de seguridad.**

RANGOS FS	GRADO DE ESTABILIDAD
< 1.2	Inestables
1.2-1.8	Potencialmente Inestables
1.8-3	Medianamente Estable
>3	Estable

Para evaluar el grado de afectación que produce un evento sísmico en la estabilidad de las laderas se estudió la incidencia de la aceleración horizontal, tomada como una fuerza horizontal, sobre un elemento infinito del talud.

El valor de la aceleración horizontal está determinado por la magnitud máxima de un evento sísmico en un periodo de retomo determinado. Para el estudio, base del presente artículo, se tomaron los valores del mapa de Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá (UPES INGEOMINAS 1997), ajustándolos a la información topográfica existente de la Localidad de Usme, a escala 1: 5000.

El período de retomo del estudio fue de 475 años y la aceleración máxima regional fue de 0.2 g. En el estudio de microzonificación sísmica con base en las características geomecánicas de los materiales y su respuesta a las cargas dinámicas producidas por un sismo se subdividió a Santa Fe de Bogotá en varias zonas. De acuerdo con las características de la Localidad de Usme se tomaron las zonas 1, 2 y 5 de dicho estudio para generar el mapa sísmico. Lógicamente se cambió la espacialización de estas zonas de acuerdo con la escala empleada aquí. Para cada una de las zonas se halló un valor similar de aceleración horizontal y de ampliación local por topografía.

El valor asumido de la aceleración horizontal fue semejante al de las características geomecánicas de las rocas y de los depósitos en las zonas diferenciadas en el estudio de microzonificación sísmica. Para la

determinación de la ampliación local se utilizó el modelo digital del terreno (MDT) y una función de vecindad para marcar las zonas de cambios topográficos importantes (mayor de 40° de pendiente). En cada una de estas zonas se origina una ampliación, que corresponde a un porcentaje de la aceleración horizontal. Estos nuevos valores de aceleración incluyen las características geomecánicas y los cambios topográficos.

El valor máximo de la precipitación en 24 horas calculado fue de 21.5 mm, con el cual se hallaron los valores máximos de precipitación en 24 horas para tiempos de retomo ( $T_r$ ) de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Con el propósito de evaluar los efectos de la precipitación máxima en un día, que se puede asemejar a la de un aguacero, se tomó el valor de 100.8 mm correspondiente a un período de retomo de 100 años.

La ecuación empleada para calcular el efecto de la lluvia (tabla de agua) en la inestabilidad del terreno (4), establecía una correlación de los diferentes factores que influyen en el proceso de infiltración de las aguas lluvias en condiciones normales. Como las condiciones del detonante dejan de ser las normales y con el propósito de seleccionar condiciones bastantes críticas se incrementó el valor de precipitación de 1 a 4.7, que corresponde a la relación entre los

valores del período de retorno a 100 años y el valor promedio normal.

Algunos factores de seguridad que reflejan el grado de estabilidad de los diversos sectores del área de interés, fueron presentados con base en los diversos escenarios de recurrencia de los factores detonantes (ver cuadro No 5.)

Para cada uno de los nueve escenarios se obtuvo un valor de FS en cada celda unitaria (pixel de 10 x 10m). los cuales fueron agrupados en cuatro categorías, de diferente grado de amenaza. De este modo se logró saber con certeza que áreas eran inestables, cuales eran estables y cuales podrían pasar a ser inestables o estables de acuerdo con la actividad antrópica y geomorfológica en la zona.

Cuadro No. 5 Períodos de retorno utilizados para los diferentes escenarios del mapa de amenaza

Escenario	Periodo de retorno	
	Precipitación	Sismicidad
1	23 AÑOS	SIN SISMO
2	23 AÑOS	50 AÑOS
3	23 AÑOS	500 AÑOS
4	20 AÑOS	SIN SISMO
5	20 AÑOS	50 AÑOS
6	20 AÑOS	500 AÑOS
7	100 AÑOS	SIN SISMO
8	100 AÑOS	50 AÑOS
9	100 AÑOS	500 AÑOS

Como la amenaza es la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, en este caso de inestabilidad, se ponderaron los diferentes escenarios y se cálculo la varianza de FS final para cada celda de cada uno de los nueve escenarios. Con el valor de la varianza se calculó la desviación estándar y el área bajo la curva normal.

Las fórmulas aplicadas fueron :

$$Z = \frac{1-FS}{\sigma(FS)}$$

Y

$$P = (0.5 + Z) 100$$

$$P = (0.5 - Z) 100$$

Donde :

Z= distancia entre el FS y la ordenada en la curva normal. Siempre representa un área menor a 1.

$\sigma$  (FS) = Desviación estándar del Factor de Seguridad.

P = Probabilidad de ocurrencia de falla.

Como la incidencia de cada escenario para la probabilidad de ocurrencia de la falla no es la misma, se utilizó la ponderación que se muestra en la cuadro No. 6 y de esta forma tener un mapa de amenaza mas real.

Cuadro No. 6 ponderación aplicada para cada escenario del Mapa de amenaza

ESCENARIO	PONDERACION
1	2.4/9
2	1.25/9
3	0.5/9
4	1.5/9
5	1/9
6	0.4/9
7	1.25/9
8	0.5/9
9	0.2/9

**Validación y afinamiento de la amenaza con las áreas dinámicas por procesos naturales y antrópicos existentes:**

Una vez obtenido el mapa de FS con las condiciones actuales del terreno se hizo un control en campo del mismo con el propósito de verificar si los resultados eran lógicos o no. A pesar de que la verificación en campo mostró que el modelo funcionaba, fue necesario calibrar algunas ponderaciones y algunos de los factores modificadores como el valor dado a la lluvia, a la pendiente transversal y a los diferentes tipos de vegetación y cobertura.

En algunos sitios con probabilidad de falla ALTA se observaron obras de protección como muros de contención, en otros donde existen los servicios de

alcantarillado y acueducto la probabilidad de falla se ve disminuida.

El mapa de amenaza final fue afinado con el mapa de áreas dinámicas por procesos naturales y antrópicos.

**Determinación de incertidumbres en la producción del mapa de amenaza:**

Uno de los puntos de incertidumbre que generaron dificultades fue el hecho de que los valores obtenidos de las muestras para parámetros como cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción ( $\phi$ ) son puntuales. Para obviar esto se utilizó la cartografía geológica detallada, los procesos geomorfológicos presentes y la génesis de los depósitos. Con base en lo anterior se zonificó el macizo rocoso creándose unidades de roca y suelo lo más uniforme posible. Posteriormente se caracterizó y muestreó cada una de dichas unidades. Con los resultados de laboratorio se estableció un rango de los valores para  $C$ ,  $\phi$  y gravedad específica. Estos valores fueron confrontados con los valores para litologías o depósitos similares en la bibliografía para luego usar el valor promedio en la fórmula del factor de seguridad (FS).

Otro aspecto a considerar fue como cuantificar los parámetros que no estaban dentro de la fórmula de factor de seguridad, pero que era

necesario incluirlos, para disminuir la incertidumbre de lo puntual de los datos geotécnicos. Para esto se formó un grupo interdisciplinario que valoró cuantitativamente dichos parámetros (vegetación, actividad antrópica, tipo de ladera), para posteriormente crear factores modificadores del FS.

Las otras incertidumbres en la producción del mapa de amenaza fueron aquellas inherentes al desarrollo de un SIG (Footc y Huebner 1995) como son las relacionadas con exactitud y precisión de la posición, de los atributos, de la concepción y la lógica. Las fuentes de error identificadas en el presente trabajo al producir el mapa de amenaza (Borrough, 1996) fueron: la desactualización de los datos y su cubrimiento parcial de algunos sectores, la densidad de observaciones que en algunas ocasiones llevó a emplear interpolaciones y extrapolaciones, el uso de datos que sustituyeron a otros que no existían, la transferencia de datos de un formato a otro, la observación incorrecta en los muestreos, la digitalización y geocodificación de mapas, entre otros.

Considerando algunas de estas incertidumbres se pudo hallar la confiabilidad del mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa la cual fue calculada en un 90 % aproximadamente.

### **Presentación e interpretación de resultados**

Para el área de estudio fueron generados mapas de factor de seguridad de acuerdo con la recurrencia de los factores detonantes de fenómenos de inestabilidad.

En la figura No.2 y figura No.3 se presentan los mapas de factor de seguridad para dos escenarios. Cada uno de estos escenarios representa los sitios donde el talud puede fallar en un período de recurrencia del factor o de los factores detonantes específicos.

Los mapas de factores de seguridad de cada escenario se hacen entonces necesarios para la planeación de obras de mitigación, las cuales se diseñarían de acuerdo con la información proporcionada por cada escenario de ocurrencia de fallas de los taludes debido a los factores detonantes.

El grado de inestabilidad asignado a los mapas de FS se realizó de acuerdo con los valores presentados en la cuadro No. 4

Como producto final se obtuvo el mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa (figura No.4), el cual representa la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de inestabilidad en un área específica. En este mapa puede interpretarse que cierto grado de amenaza está

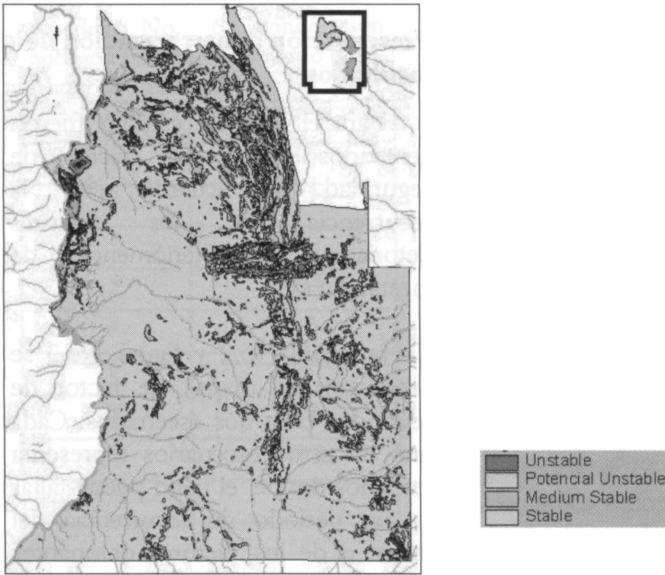


Figura 2. Factor de seguridad para un periodo de retorno de lluvia de 20 años y un periodo de retorno de sismos de 500 años

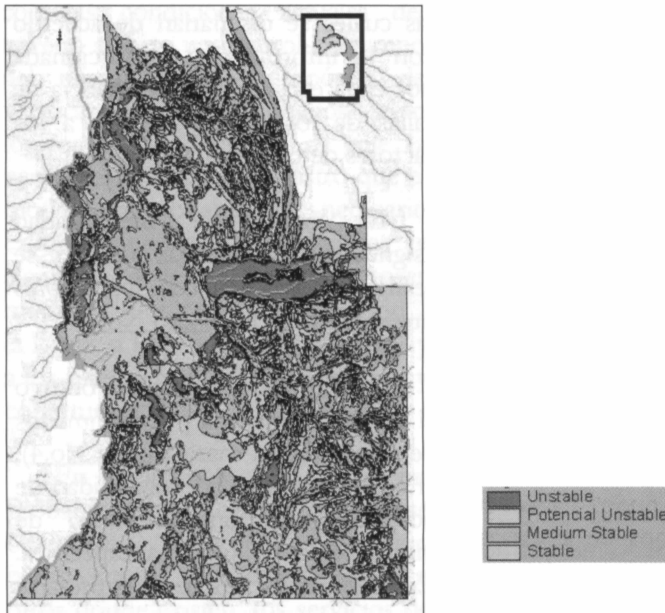


Figura 3. Factor de seguridad para un periodo de retorno de lluvia 2.3 años sin sismos.



dado por la probabilidad de que ocurra un fenómeno de inestabilidad desencadenado por la presencia de factores de susceptibilidad intrínseca favorables o desfavorables para dicho fenómeno, además de factores detonantes como lluvia y sismicidad, que pudieran acelerar estos fenómenos en períodos de recurrencia diversos.

Las unidades de amenaza zonificadas, se presentan en la cuadro No.7, con su respectiva descripción y porcentaje de ocurrencia en el área de estudio.

Otros productos intermedios generados durante el desarrollo del modelo de amenaza serán de gran utilidad para la toma de decisiones en relación con los problemas que presenta el área de estudio. Algunos de ellos son los mapas de áreas dinámicas y de materiales.

El mapa de áreas dinámicas (figura No.5) constituye un buen indicativo de las áreas inestables, porque combina otros factores que los modelos matemáticos no toman en cuenta, tales como el origen y evolución de las geoformas, la presencia de áreas antiguas, potencialmente activas de fenómenos de remoción en masa.

En este mapa se presentan los siguientes procesos: Escarpe erosivo doble, escarpe erosivo, escarpe de terraza, zonas de rocas sueltas, abanico fluvial estabilizado y

disectado muy antiguo, flujo fluvioglaciario estabilizado y disectado muy antiguo, pequeños flujos de escombros, deslizamientos menores translacionales, acequias, zonas con reptación, zona mal drenada, zonas con cárcavas antiguas, escarpe de deslizamiento, zonas con deslizamientos pequeños y superficiales, zona de caída de rocas, escarpe de cárcava, cicatriz de fenómeno de remoción en masa.

Las zonas delimitadas fueron: Zona de cantera, antiguas zonas de canteras, zona de explanación y/o relleno, zonas de relleno, zonas de erosión hídrica, zonas de erosión difusa, zonas de socavación.

Para producir el mapa final de amenaza (figura No. 4) fueron considerados estos aspectos, los cuales permitieron afinar dicho mapa en relación con los procesos dinámicos existentes y la intervención antrópica del sector, que se comportan como factores desencadenadores de fenómenos de inestabilidad.

El detalle de los procesos geomorfológicos hace útil el mapa de áreas dinámicas para la planeación urbanística y de obras de estabilidad.

El mapa de materiales producido en este estudio es muy útil debido a que involucra las características geotécnicas, geológicas y geomorfológicas del

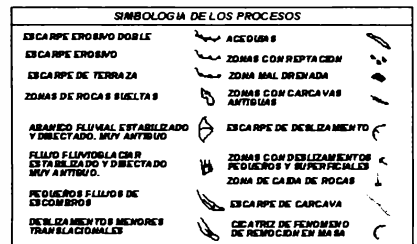
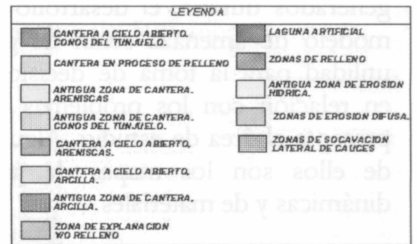
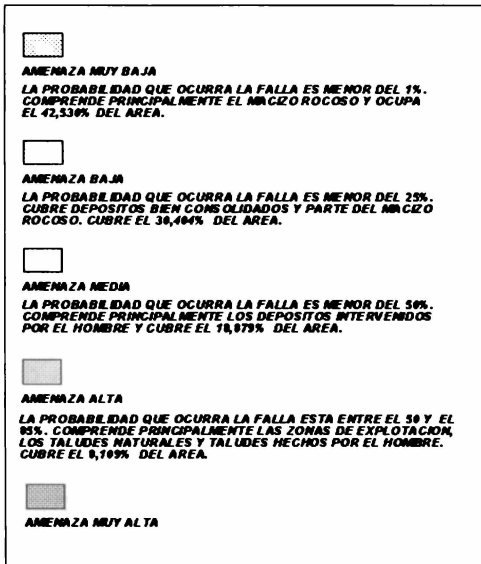


Figura 4. Mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa

Figura 5. Mapa de áreas dinámicas. Localidad de Usme, Santafé de Bogotá, Colombia.

Cuadro No. 7 Leyenda del mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa. Localidad de Usme

AMENAZA	DESCRIPCION
MUY ALTA	La probabilidad que ocurra la falla es mayor del 85%. Incluye principalmente los taludes de las quebradas, de las vías y de las canteras y cubre el 0,116% del área.
ALTA	La probabilidad que ocurra la falla esta entre el 50 y el 85%. Comprende principalmente las zonas de explotación y los taludes naturales e impactados por el hombre y cubre el 7,646% del área.
MEDIA	La probabilidad que ocurra la falla es menor del 50%. Corresponde principalmente a los depósitos intervenidos por el hombre y cubre el 19,603% del área.
BAJA	La probabilidad que ocurra la falla es menor del 25%. Cubre depósitos bien consolidados y parte del macizo rocoso y abarca el 72,635% del área.

área de estudio. Sus unidades poseen una información amarrada de parámetros geotécnicos y de contenido de agua, los cuales sirvieron de base para el desarrollo del modelo (figura No.1). La mayor importancia de este producto es que permitió generar los mapas de FS, los cuales, en gran parte, incluyen las características fisico-mecánicas del material. También puede ser empleado en la toma de decisiones para el diseño de obras de mitigación en el sector.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En general el mapa de amenaza generado con el presente estudio tiene una confiabilidad del 90 %, pero debe tenerse en cuenta que cualquier actividad antrópica antitécnica como las construcciones o la explotación de materiales, hará variar los porcentajes de

probabilidad de falla incrementándolos. También debe tenerse en cuenta la dinámica de urbanización, la cual origina cambios en el nivel de amenaza de tal manera que, en menos de seis meses, un nivel de amenaza baja se transforme a media o de media a alta.

Intrínsecamente un gran porcentaje de los diferentes tipos de materiales existentes en el área tienen una resistencia media a alta. Lo anterior implica que los factores naturales físicos no son los que más influyen en el origen de los fenómenos de remoción en masa.

Otro factor que tampoco incide mucho en la inestabilidad es el climatológico, porque la cantidad de lluvia y su distribución anual en el sector de la localidad de Usme, no son críticos y normalmente no mantienen saturados los diferentes materiales.

La pendiente transversal juega un papel importante en la presencia de los fenómenos de remoción en masa, pero tampoco es el factor más importante, originador del fenómeno.

El factor antrópico es el principal aspecto en preparar y desencadenar los fenómenos de inestabilidad.

Se destaca la falta de una técnica apropiada para las construcciones, además los sitios donde se construye generalmente carecen de un buen manejo de las aguas lluvias, así como de las aguas residuales.

Dentro del aspecto antrópico, se deben incluir los servicios básicos ilegales, específicamente el agua para consumo humano que es transportada por medio de mangueras, muchas de las cuales están rotas, permitiendo así la saturación del material o la transmisión de la presión hidrostática de la conducción cuando están enterradas en laderas de alta pendiente.

El sistema de información geográfica ha sido una herramienta muy útil para la generación del mapa de amenaza por la facilidad con que se pudo combinar y analizar toda la información temática utilizada.

Las áreas de amenaza muy alta cubren al menos el 1% del área, mientras que las de amenaza alta llegan hasta el 5%. En conclusión el porcentaje de áreas estables es alto.

La probabilidad de la ocurrencia de

falla del terreno se verá disminuida en algunos sitios, al ejecutarse el plan de abastecimiento de servicios públicos diseñado por el área técnica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).

### **Agradecimientos**

Los autores del presente artículo agradecen a la dirección de prevención y atención de emergencias, para la cual se efectuó el presente estudio, por permitir su publicación. A la consultora IGL la cual manejó el proyecto y contrató al personal idóneo para su ejecución. A todos los ingenieros y geólogos que participaron en el estudio y que hicieron posible su culminación exitosa.

### **REFERENCIAS**

---

- Acosta, J., & Beltrán, W., 1987. *Estratigrafía de la Formación La Regadera en el flanco occidental del Sinclinal de Usme*. Trabajo de grado No. 182. Bogotá: Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia.
- González Alvaro, 1990. Metodología para estudios de riesgo por deslizamiento a escala intermedia. *VI Jornada Geotécnica*, Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Guerrero, J., & Sarmiento, G., 1996. *Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero*. Implicaciones en exploración

- petrolera. *Geología Colombiana*, 20: 39.
- Guevara Delgado Carlos. Aspectos fotogeológicos y estratigráficos al sur de Payande, - Tolima - Colombia. *Revista CLAF* 10 (1): 59-72.
- Hernández, P., & Uscátegui, J. 1976. *Geología de un sector del área urbana de Bogotá y sus posibles implicaciones geotécnicas*. Trabajo de grado No. 15. Bogotá: Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Hettner, A., 1892. *Die Kordillere von Bogotá*. Petermanns Mitteilungen, Ergänzungsheft 104. Justus Pertha, Gotha.
- Hubach, E., 1957. Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus alrededores. *Boletín Geológico* 5 (2): 92-112.
- Julivert, M. 1968. *Lexique Stratigraphique International*. Vol. V, Fascicule 4A, Colombie, 651 pp. París.
- Julivert, M., Porta, J., & Tellez, N., 1963. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. *Boletín de Geología*, 13-14.
- Foote, Kenneth E.; Huebner, Donald J. 1995. *The Geographer's Craft Project*. Austin: University of Texas at Austin.
- Medina, A., & Peña, G., 1989. *Análisis geológico estructural de los Sinclinales de Usme y Chipaque, Departamento de Cundinamarca*. Trabajo de grado No. 216. Bogotá: Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia.
- Renzoni, G., 1962. Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este y sureste de Bogotá. *Boletín Geológico* 10 (1-3): 59-80.
- Tomas Shuk 1994. Evolución y el estado actual de la metodología basado en taludes naturales para el análisis de estabilidad en masa de materiales geológicos.
- Ujueta, G., 1962. Geología del noreste de Bogotá. *Informe 1412*. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- UPES-INGEOMINAS 1997. Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá. Santafé de Bogotá: INGEOMINAS.
- Van der Hammen, T. 1957. Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental de Colombia). *Boletín Geológico*, 5(2): 189-207.
- Van Westen, C.J. 1993. *Application of geographic systems to landslide hazard zonation*.