



Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente  
Hacia una proyección social



## **CONTRATO INTERADMINISTRATIVO CVC – UNIVALLE 188 DE 2008**

### **PROYECTO MIDAS**

**ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS Y ESCENARIOS DE RIESGO  
POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y  
CRECIENTES TORRENCIALES DEL ÁREA URBANA Y DE  
EXPANSIÓN DE LOS MUNICIPIOS DE BUGA, RIOFRÍO, DAGUA,  
EL CAIRO Y LA UNIÓN**

**INFORME FINAL DE AMENAZAS POR  
REMOCIÓN EN MASA  
PARA EL MUNICIPIO DE RIOFRÍO**

**SUPERVISIÓN A CARGO DE  
HIDROOCCIDENTE**

**Santiago de Cali, Julio de 2010**

## TABLA DE CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	4
<b>1. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA</b>	<b>6</b>
<b>1.1. TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD</b>	<b>6</b>
2.1.1. Método bivariado	6
<b>1.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES</b>	<b>9</b>
1.2.1. Pendiente (PEND)	10
1.2.2. Curvatura (CURVAR)	10
1.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)	13
1.2.4. Usos del Suelo (USO)	13
1.2.5. Geología (GEOL)	13
<b>1.3. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD</b>	<b>17</b>
<b>2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA</b>	<b>21</b>
<b>2.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES</b>	<b>21</b>
<b>2.2. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO</b>	<b>22</b>
<b>2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD</b>	<b>23</b>
<b>2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN</b>	<b>25</b>
<b>2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE</b>	<b>25</b>
2.5.1. Falla Planar en Talud Infinito	25
<b>3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS</b>	<b>32</b>
<b>3.1. FUERZA SÍSMICA</b>	<b>32</b>
3.1.1. Escenario 1. Talud parcialmente Saturado sin Sismo	33
3.1.2. Escenario 2. Talud Seco con Sismo	35
3.1.3. Escenario 3. Talud parcialmente Saturado con Sismo	37
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>41</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>43</b>
<b>6. ANEXOS</b>	<b>44</b>
<b>Anexo 2.1: Análisis por Secciones Falla Rotacional</b>	<b>45</b>

## CONTENIDO DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos _____	25
<b>Tabla 3.1</b> Escenarios de análisis para la estimación de factores de seguridad. _____	32
<b>Tabla 3.2</b> Rangos del Factor de Seguridad para definir el nivel de amenaza. _____	33

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996). _____	8
Figura 1.2 Mapa de pendientes, municipio de Riofrío. _____	11
Figura 1.3 Mapa de curvatura, municipio de Riofrío _____	12
Figura 1.4 Mapa de orientación, municipio de Riofrío. _____	14
Figura 1.5 Mapa de usos del suelo, municipio de Riofrío. _____	15
Figura 1.6 Mapa de geología, municipio de Riofrío _____	16
Figura 1.7 Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa. _____	18
Figura 1.8 Mapa de Susceptibilidad del municipio de Riofrío. _____	19
Figura 2.1 Esquema metodológico general. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa. _____	22
Figura 2.2 Localización en planta de secciones en estudio. _____	23
Figura 2.3 Perfil geológico geotécnico tomado de la sección B-B'. _____	24
Figuras 2.4 Perfil geológico geotécnico tomado de la sección J-J'. _____	24
Figura 2.5 Tipos de fallas traslacionales. _____	26
Figura 2.6 Bloque diagrama de la falla rotacional. _____	27
Figura 2.7 Análisis de equilibrio límite, sección C-C', talud parcialmente saturado sin sismo. _____	28
Figura 2.8 Análisis de equilibrio límite, sección C-C', talud seco con sismo. _____	28
Figura 2.9 Análisis de equilibrio límite, sección C-C', talud parcialmente saturado con sismo. _____	29
Figura 2.10 Análisis de equilibrio límite, sección F-F', talud parcialmente saturado sin sismo. _____	29
Figura 2.11 Análisis de equilibrio límite, sección F-F', talud seco con sismo. _____	30
Figura 2.12 Análisis de equilibrio límite, sección F-F', talud parcialmente saturado con sismo. _____	30
Figura 3.1 Distribución porcentual de amenaza, escenario 1. _____	33
Figura 3.2 Mapa de amenaza, escenario 1. _____	34
Figura 3.3 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 2. _____	35
Figura 3.4 Mapa de amenaza, escenario 2. _____	36
Figura 3.5 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 3. _____	37
Figura 3.6 Mapa de amenaza, escenario 3. _____	38

## INTRODUCCIÓN

El presente estudio obedece al Informe final **“Susceptibilidad y Amenazas por Remoción en Masa correspondiente a el Municipio de Riofrío”**, realizado por la firma Consultores en Ingeniería y Medio Ambiente – CI Ambiental Ltda., en quien la Universidad del Valle delegó la ejecución de los estudios de geotecnia en cuanto a la exploración del subsuelo y la aplicación de la metodología y los modelos para la determinación de la susceptibilidad y las amenazas de la remoción en masa; contando para ello con la aprobación de la supervisión del Contrato de Consultoría No. 091 de 2009, entre la Universidad del Valle y CI Ambiental Ltda.

Es pertinente mencionar que este estudio hace parte del Estudio de “Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales del área urbana y de expansión de los municipios de El Cairo, Buga, Riofrío, Dagua, y La Unión (Proyecto MIDAS)”, realizado a través del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente en el marco del Contrato No. 188 CVC-UNIVALLE.

# **1. EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA**

# 1. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

## 1.1. TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

La susceptibilidad ante la ocurrencia de movimientos en masa es definida por Fell *et al.* (2008) como la evaluación cuantitativa o cualitativa de la clasificación, volumen (o área) y distribución espacial de los movimientos en masa que existen o potencialmente pueden ocurrir en un área; la probabilidad de ocurrencia, que depende también de la recurrencia de los factores desencadenantes tales como lluvia y sismicidad no es considerada.

Existen diversas aproximaciones para evaluar la susceptibilidad del terreno basadas principalmente en la determinación de los factores que contribuyen con la ocurrencia de estos procesos (relieve, la geología, condiciones de los materiales superficiales, modificaciones de las condiciones naturales de vegetación e intervención antrópica). Generalmente, se combinan estos factores en forma cartográfica y así se definen los grados de susceptibilidad.

Existen dos principales procedimientos utilizados en la evaluación y confección de los mapas de susceptibilidad:

- Métodos Cualitativos
- Métodos Cuantitativos

En el desarrollo de este proyecto se utilizó el método estadístico bivariado a escala 1:5.000, incluido en los métodos cuantitativos de evaluación de susceptibilidad. El procesamiento de la información base y los resultados fueron integrados por medio de herramientas SIG, usando el formato *raster* que implica la división de la zona en unidades de tamaño regular, normalmente cuadradas, donde en cada celda se asigna un valor para un factor determinado.

### 1.1.1. Método bivariado

El análisis estadístico bivariado (Figura 1.1), se basa en el modelo de pesos de las variables y aplica la teoría de probabilidad Bayesiana, de modo que se puede evaluar la importancia de cada factor que influye en los movimientos independientemente.

Según Neuhauser y Terhorst (2007) para aplicar el método, es necesario conocer datos históricos de movimientos en masa, dado que se asume que los movimientos futuros ocurrirán bajo factores o condiciones similares a la de los movimientos pasados; también se asume que los factores que causan los movimientos permanecen casi constantes en el tiempo.

El principio de este método es el concepto de probabilidad *a priori* y condicional/posterior. La probabilidad  $P$  es usualmente determinada empíricamente con el conocimiento de la ocurrencia de un evento  $D$  en el pasado bajo condiciones similares, y es definida como la probabilidad *a priori*  $P(D)$ . Esta probabilidad puede ser modificada con datos  $B$  que influyen la probabilidad y son obtenidos de experimentos o análisis. Aquí, se denominan los factores causantes. Cuando los factores

causantes se integran al cálculo de la probabilidad, esta se define como una probabilidad condicional o posterior  $P(D/B)$ . Esta probabilidad posterior expresa la probabilidad que un evento  $D$  ocurrirá bajo la presencia de un factor causante  $B$ . Ambas probabilidades (*a priori* y posterior) son integradas en el Teorema de Bayes:

$$P(D/B) = \frac{P(D)*P(B/D)}{P(B)} \quad (1)$$

La superposición de los movimientos en masa con cada factor causante, permite calcular la relación estadística entre ellos, y evaluar la importancia de la ocurrencia en los movimientos antiguos. Un par de pesos  $W^+$  y  $W^-$  es calculado para cada factor causante. Las ponderaciones dependen de las relaciones espaciales entre los movimientos y los factores causantes. Este cálculo se realiza mediante la aplicación de cocientes de probabilidad, que describen como probablemente un movimientos ocurrirá en el caso de presencia de factores causantes y en el caso de ausencia de éstos:

$$W_j^+ = Ln \frac{P(D/B_i)}{P(D/\bar{B}_i)} \quad (2) \quad W_j^- = Ln \frac{P(\bar{D}/B_i)}{P(\bar{D}/\bar{B}_i)} \quad (3)$$

Donde  $W^+$  es el cociente de probabilidad que expresa la relación en caso de presentarse los factores causantes  $B$  (de un número  $j$  de factores causantes) un movimiento puede o no ocurrir.  $W^-$  expresa la misma relación en caso ausencia de factores causantes. En consecuencia, los pesos dan información si hay una correlación positiva o negativa entre los factores causante y los lugares de movimientos.

Para evaluar la contribución de los factores en los movimientos, las ecuaciones 2 y 3 se reescriben en función del número de celdas del modelo digital de elevación (DEM) que se utilice (Dahal *et al.*, 2008):

# Bivariate statistical analysis

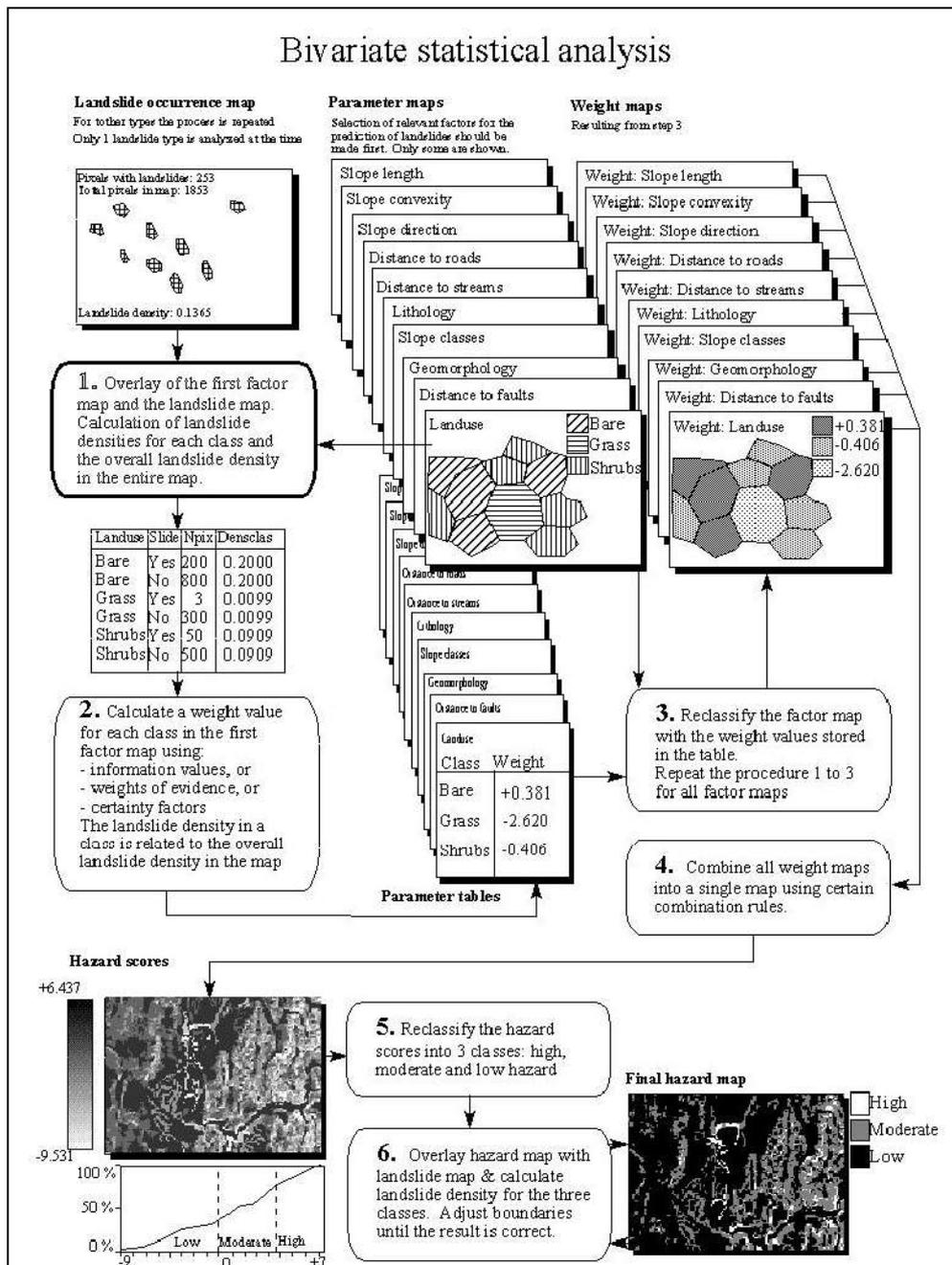


Figura 1.1 Diagrama de flujo general del método estadístico bivariado (Van Westen, 1996).

$$W_j^+ = \frac{\frac{Np_{jx_1}}{Np_{jx_1} + Np_{jx_2}}}{\frac{Np_{jx_3}}{Np_{jx_3} + Np_{jx_4}}} \quad (4)$$

$$W_j^- = \frac{\frac{Np_{jx_2}}{Np_{jx_1} + Np_{jx_2}}}{\frac{Np_{jx_4}}{Np_{jx_3} + Np_{jx_4}}} \quad (5)$$

Donde  $W^+$  es el cociente de probabilidad que expresa la relación en caso de presentarse los factores causantes B (de un número  $j$  de factores causantes) un movimiento puede o no ocurrir.  $W^-$  expresa la misma relación en caso ausencia de factores causantes. En consecuencia, los pesos dan información si hay una correlación positiva o negativa entre los factores causante y los lugares de movimientos.

Adicionalmente, se define el peso total así:  $W_f = W^+ - W^-$  que representa una medida de correlación espacial entre los factores causante y los movimientos en masa. Si el peso total es positivo, el factor es favorable para la ocurrencia de movimientos, si este es negativo, es desfavorable.

Los pesos obtenidos son asignados a las clases de cada factor causante, para definir por medio de la suma algebraica de los pesos totales, el Índice de Susceptibilidad por Movimientos en Masa (LSI), el cual integra los aportes de cada uno de los factores causantes, así:

$$LSI = \sum W_f$$

Donde  $j$  es el número de factores considerados.

## 1.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES

En la investigación de la influencia de los parámetros físicos en los movimientos en masa, se analiza la correlación entre los movimientos y las variables que los representan. En este estudio las variables utilizadas son: pendiente, curvatura, aspecto, uso del suelo y cuenca acumulada, las cuales son analizadas con el Método Bayesiano, anteriormente explicado.

Dentro de este grupo de variables, las correspondientes con características geométricas del relieve, son derivadas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). Las variables temáticas como uso del suelo, son obtenidas a partir de la cartografía elaborada en otras componentes del proyecto.

✓ **Modelo Digital de Elevación (MDE)**

Se denomina Modelo Digital de Elevaciones a la representación numérica de la elevación del terreno en un medio digital. Dicha representación es posible en varios formatos, en este caso el raster, cuya resultante es una imagen en la cual cada píxel contiene los valores de las coordenadas planas x, y, y el valor de altura en dicho punto.

Para esta zona de estudio se generó un MDE con celdas cuadradas de de 10 m x 10 m, basados en el nivel de detalle que presentaba la información topográfica.

Para la aplicación del método es necesario categorizar las variables, puesto que éste calcula el peso de los movimientos en cada categoría basado en la presencia o ausencia del movimiento en el área. Las variables temáticas como uso del suelo, son obtenidas a partir de la cartografía elaborada en otras componentes del proyecto.

**1.2.1. Pendiente (PEND)**

Variable geométrica continua, obtenida a partir del MDE; es definida como el ángulo formado por la superficie del terreno y la horizontal. Se expresa en grados, en un rango entre 0 y 90. En la figura 1.2, se ilustra la distribución de las pendientes en la zona de estudio. Obsérvese que el casco urbano y la zona de expansión se encuentran en una zona de pendientes muy suaves, y que en la parte norte hacia la zona montañosa las pendientes oscilan entre 10 y 30 grados, presentando pendientes relativamente suaves.

**1.2.2. Curvatura (CURVAR)**

Indica el grado de Convexidad / Concavidad del terreno. Se determina mediante el radio de curvatura de la celda según un plano vertical. Se define como la tasa de cambio de la pendiente y depende de las derivadas de segundo grado de la altitud. La variable se deriva del MDE, siendo cuantitativa continua, con un rango de valores variable según la zona pero que oscila entre -20 y 20 de unidades de 1/100 metros. El valor 0 en una celda corresponde a una superficie plana formada entre la celda en cuestión y sus ocho celdas vecinas, valores positivos indican que la superficie es convexa hacia la celda y valores negativos indican concavidad hacia la celda. La variable se genera como una malla regular de puntos flotantes.

La variable se relaciona con los deslizamientos o movimientos en masa en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia la celda, mientras que se dispersa en las convexas. En las primeras es de esperar un aumento de la presión de agua en los poros y una mayor acumulación de formación superficial, elementos que favorecen la aparición de movimientos en masa. Una curvatura cóncava es más efectiva en la captación agua lluvia (Carrara, 1983, Oyagi, 1984, Smith, 1988, Gao, 1993). En algunos estudios se indica que los deslizamientos superficiales ocurren principalmente en convergencias topográficas donde se concentra el flujo, tales como depresiones canalizadas y hondonadas. Finalmente, en la Figura 1.3 se observa la presencia de una gran cantidad de zonas cóncavas que pueden ser una fuente importante de almacenamiento de agua.

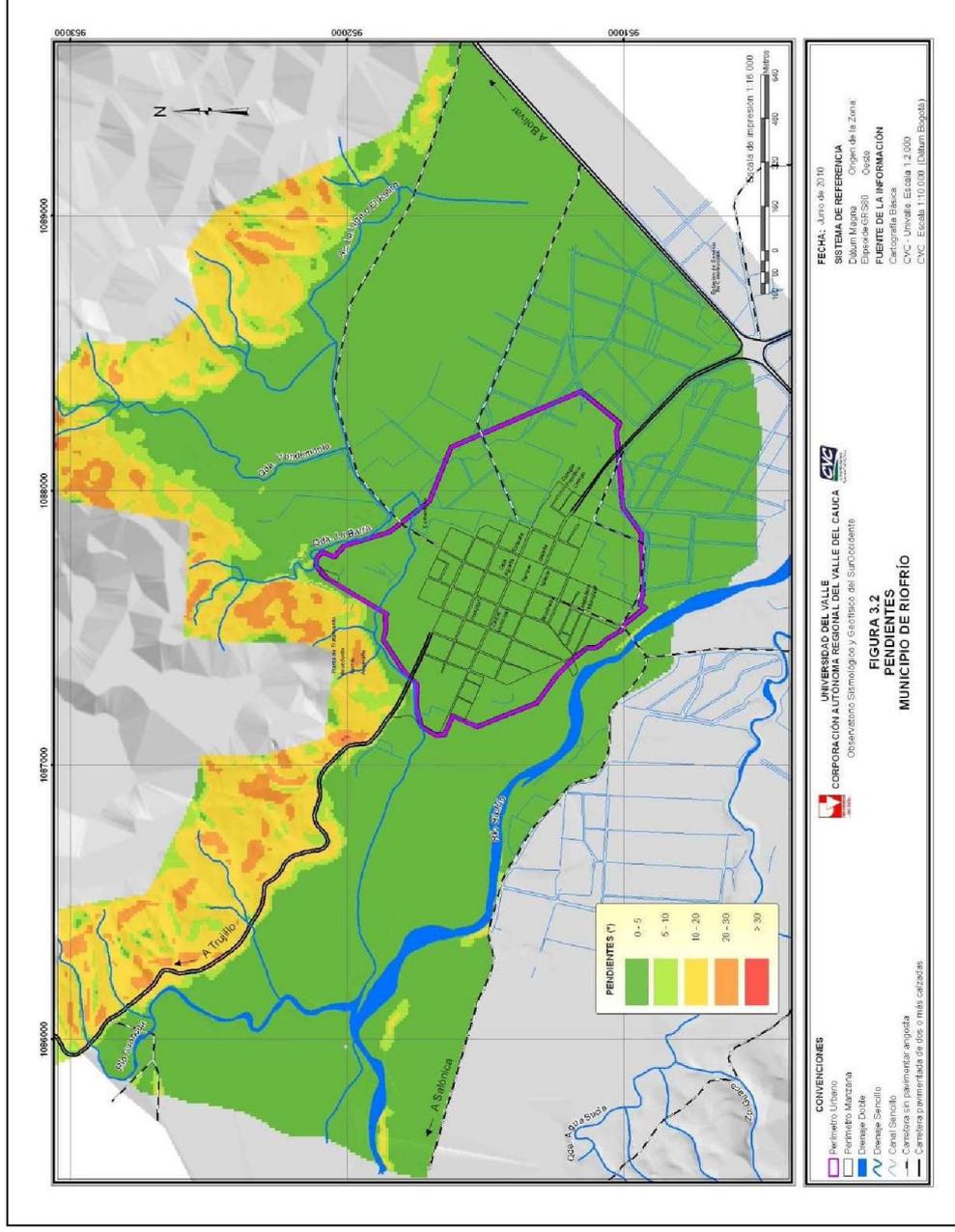


Figura 1.2 Mapa de pendientes, municipio de Riofrio.



### **1.2.3. Orientación de la ladera (ORIENTACIÓN)**

Variable, definida como la dirección de exposición de la ladera en un punto y que representa la dirección de la máxima pendiente calculada para cada celda. Se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en un punto dado. Se trata de una variable derivada del MDE, cuantitativa, continua y con un rango de valores de 1 a 360 grados. La orientación indica de manera indirecta la situación de una ladera en cuanto a su insolación y, por lo tanto, si una ladera se encuentra húmeda o seca con mayor frecuencia.

También se puede interpretar en términos de cantidad de vegetación (por ejemplo en zonas umbrías suele existir más bosque o matorral y una mayor estabilidad de la formación superficial por la presencia de raíces). La orientación de la ladera también influirá en la cantidad de lluvia recibida, según la dirección de avance de los frentes nubosos (Figura 1.4).

### **1.2.4. Usos del Suelo (USO)**

Representa la vegetación o cobertura vegetal del área de estudio, y el uso actual del suelo. Esta variable es de tipo cualitativo y se deriva del mapa de cobertura y uso del suelo. La cobertura del suelo, influye en la estabilidad de depósitos, suelos y macizos rocosos. En la Figura 1.5, se ilustra el mapa de cobertura actual del suelo del municipio de Riofrío.

### **1.2.5. Geología (GEOL)**

Variable cualitativa que se deriva de la cartografía de unidades geológicas, y representa el tipo de material geológico a nivel superficial (Figura 1.6).

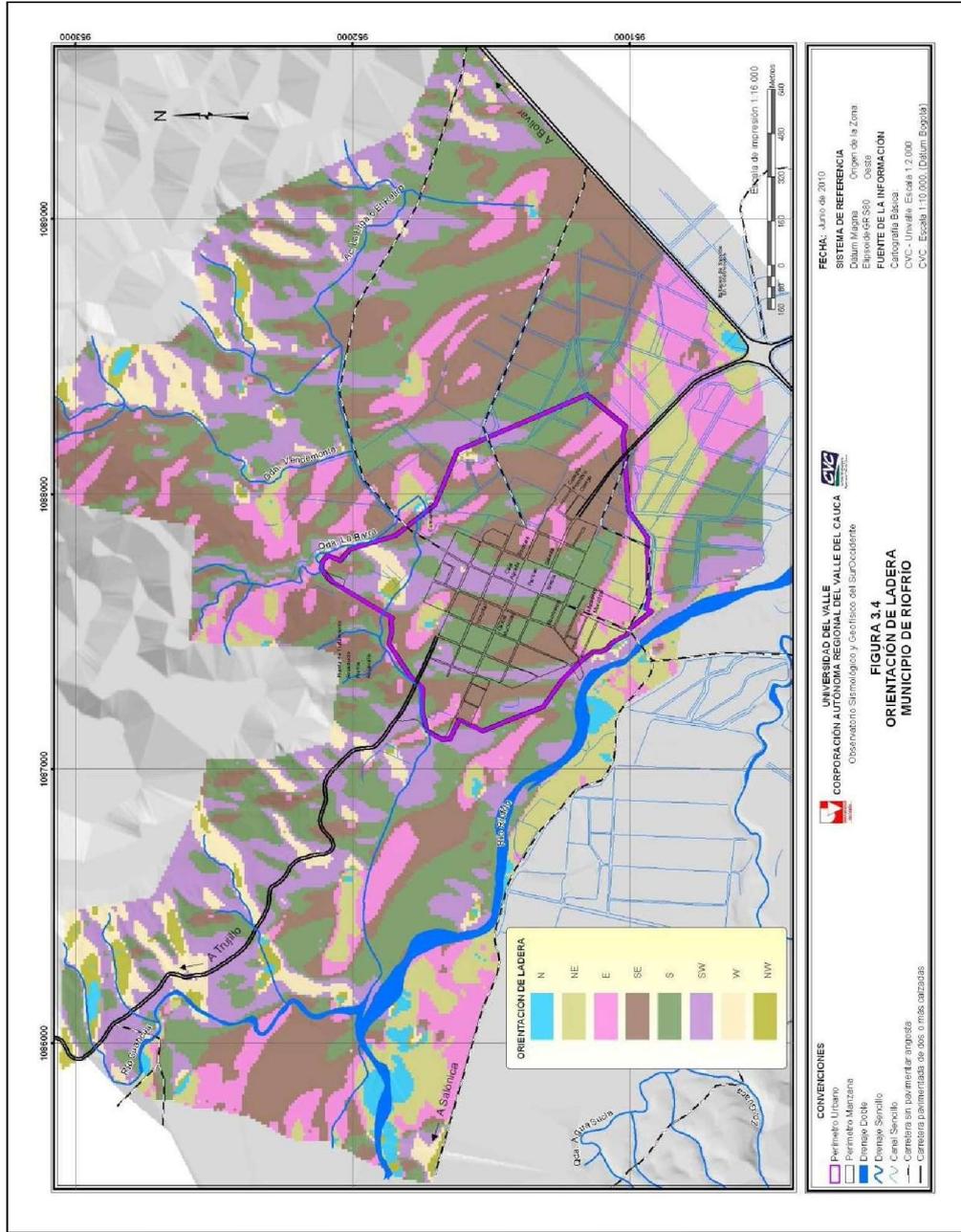


Figura 1.4 Mapa de orientación, municipio de Riofrío.

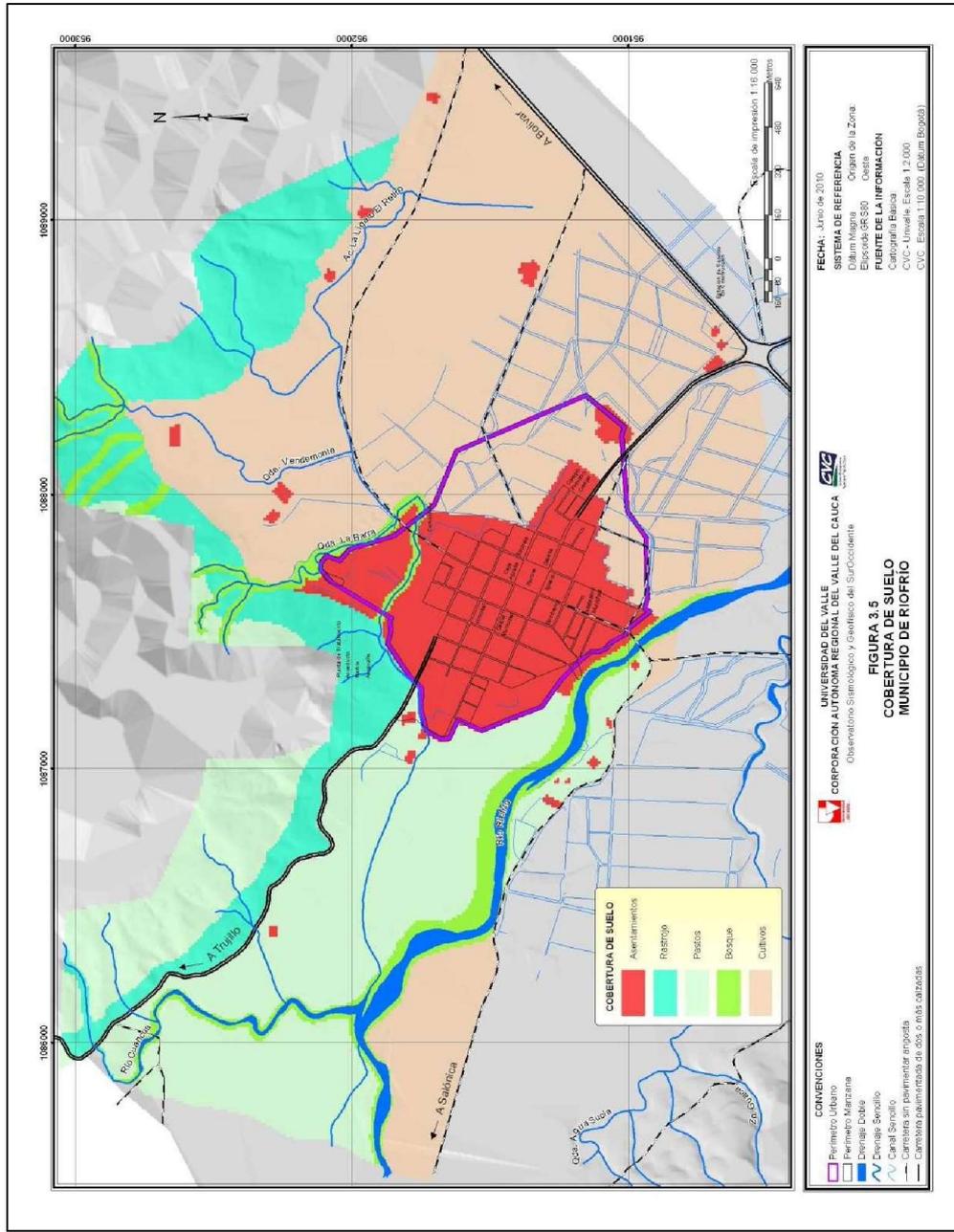


Figura 1.5 Mapa de usos del suelo, municipio de Riofrio.



### 1.3. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

Como se explicó anteriormente, la evaluación de la susceptibilidad se realizó por medio del análisis bivariado, lo que implica, tomar cada una de las variables categorizadas y cruzarlas con la variable movimiento, para obtener un resultado intermedio del análisis de pesos  $Wf$  de cada variable según las ecuaciones (4) y (5) presentadas en el apartado 3. Una vez obtenidos todos los factores  $Wf$ , se suman las variables para obtener el índice LSI según la siguiente expresión:

$$LSI = WfPend + WfCurvar + WfOrientación + WfUsos + WfGeología$$

Una vez aplicado el método en cada una de las variables, se observa que los factores cuyos pesos indican mayor relación con la presencia de los movimientos en masa son la Pendiente, Orientación y Uso del suelo. En general las zonas con pastos tienen mayor peso y podrían generar problemas de inestabilidad; las zonas intervenidas por cultivos tienen menor peso con relación al anterior, en la ocurrencia de movimientos.

En cuanto la variable Pendiente, tiene una gran influencia en la generación de zonas de inestabilidad, de acuerdo con los pesos  $Wf$  positivos que representan estas variables.

La clasificación de los Índices en categorías de susceptibilidad, se basó en el método de *Divisiones Naturales* (Natural Breaks)<sup>1</sup> del programa SIG ArcGIS, el cual busca los grupos “inherentes” de los datos, es decir, identifica saltos o puntos de quiebre en secuencias de valores similares y maximiza las diferencias entre clases. El método induce cierta homogeneidad en las categorías. Una vez calculados los pesos para cada una de las variables, se realiza la suma algebraica de las mismas para obtener el mapa Índice de Susceptibilidad (LSI), cuyos resultados se presentan a continuación (ver Figura 1.7 y Figura 1.8 y Mapa 1.1: Índice de Susceptibilidad para el municipio de Riofrío).

- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD ALTA:** Zonas con condiciones altamente favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad asociados principalmente con movimientos antiguos y zonas de acumulación de movimientos en masa, además de las características litológicas del material aflorante en la zona, y de fuertes pendientes que caracterizan la zona norte del municipio.
- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD MEDIA:** Las zonas de susceptibilidad media están relacionadas con pendientes topográficas bajas a muy bajas. Se encuentran ubicada hacia las zonas de piedemonte, correspondiendo básicamente a la transición entre la zona montañosa y la zona plana.
- ✓ **SUSCEPTIBILIDAD BAJA:** Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad. Estas zonas son susceptibles a procesos de inundación y avalanchas torrenciales y los resultados de estos fenómenos se presentan en el capítulo de hidráulica.

---

<sup>1</sup> <http://webhelp.esri.com>



*Figura 1.7 Distribución porcentual de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa.*

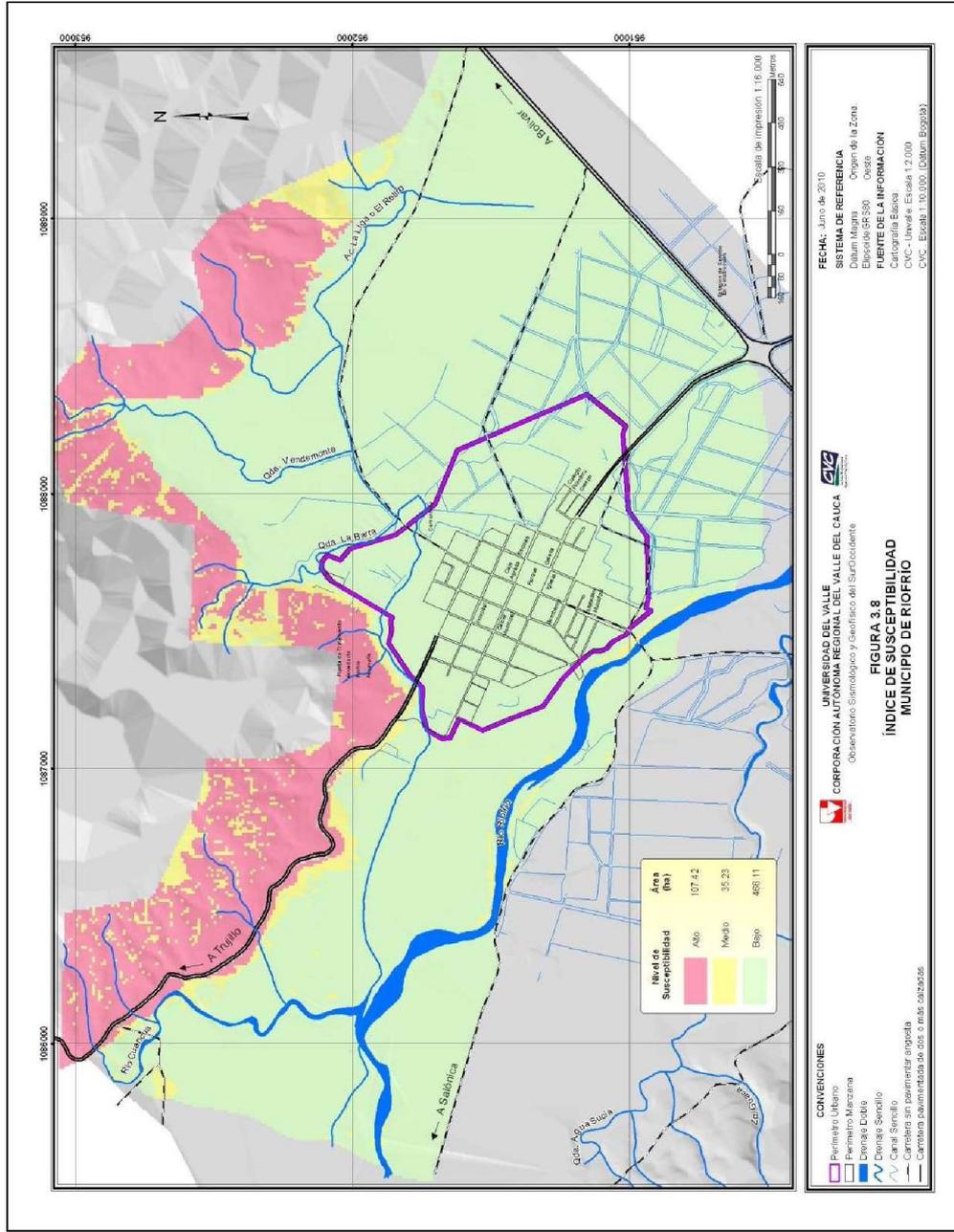


Figura 1.8 Mapa de Susceptibilidad del municipio de Riofrio.

## **2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA**

## **2. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA**

La zonificación de amenazas de un territorio es una de las herramientas necesarias para la administración racional de la ocupación de áreas socio-económicamente aprovechables. Permite la toma de decisiones tendiente al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, a cargo de entes territoriales ya que es un insumo para el ordenamiento territorial, la planeación del desarrollo y la gestión de riesgos, entre otros. Es fundamental para determinar bien sea el emplazamiento de vivienda, usos comerciales, industriales, institucionales, recreación pasiva, infraestructura, conservación entre otros. Además permite restringir y condicionar el uso del suelo, en zonas de amenaza alta, de manera que se eviten futuros riesgos.

La amenaza por movimientos en masa de una ladera, entendida como un evento natural, humano o combinado, potencialmente destructivo de vidas, bienes, economía y/o cultura de una comunidad (INGEOMINAS, 2006), involucra en su evaluación, el conocimiento claro del tipo de movimiento en masa amenazante activo o potencial, así como estimativos de su magnitud, recurrencia y localización geográfica. Esta es una actividad compleja que requiere una gran cantidad de información de aspectos tales como: topografía, cobertura y usos del suelo, geología (geología para ingeniería, estratigrafía, geología estructural) geomorfología, clima, hidrología, hidráulica, hidrogeología (niveles piezométricos y su variación en el tiempo, régimen de flujo de aguas subterráneas), parámetros geomecánicos de materiales e intensidad y probabilidad de ocurrencia de factores detonantes tales como lluvias y sismos.

En este capítulo se presenta la metodología seguida, así como las técnicas numéricas de equilibrio límite utilizada en los análisis de estabilidad.

### **2.1. ASPECTOS METODOLOGICOS GENERALES**

Para la evaluación de la amenaza se tuvo en cuenta el mapa de susceptibilidad previamente obtenido, el cual tiene en cuenta, la predisposición o susceptibilidad de las laderas del área de estudio a desarrollar este tipo de procesos, evaluada mediante la herramienta SIG. Al anterior mapa se le incorporan los agentes externos sismo y lluvia, para de esta manera obtener el respectivo mapa de amenaza. Dentro de este mapa se tienen en cuenta aspectos tales como: inclinación del terreno, parámetros de resistencia, pruebas de infiltración y sismicidad de la zona.

Para el caso de las áreas altamente susceptibles a los movimientos en masa tipo flujo torrencial, la evaluación de la amenaza se realizó con base en el modelo digital del terreno, características geotécnicas de los materiales superficiales.

En la Figura 2.1, se ilustra el esquema metodológico general utilizado para evaluación de la amenaza por movimientos en masa, nótese que el mapa de amenazas depende básicamente del mapa de susceptibilidad al cual se le han adicionado los agentes detonantes lluvia y sismo. En este orden de ideas se procederá a continuación a detallar la obtención de dicho mapa.

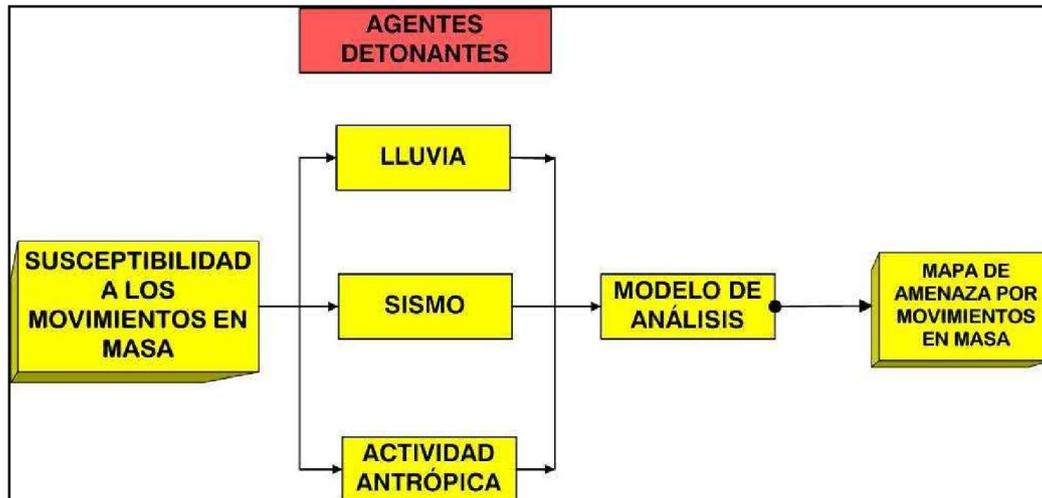
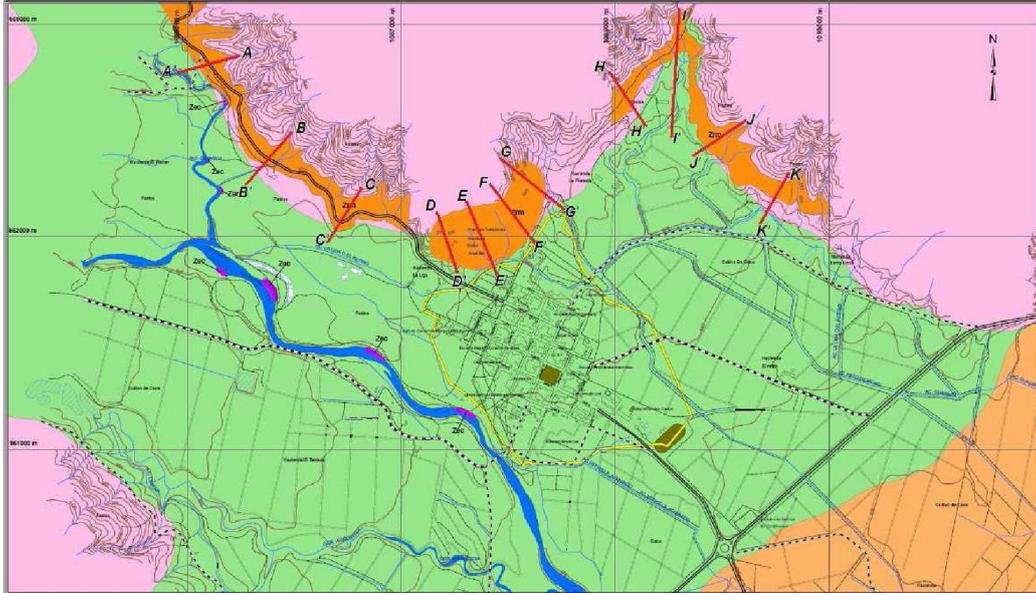


Figura 2.1 Esquema metodológico general. Evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

## 2.2. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

El modelo geológico-geotécnico se define como aquel que involucra aspectos geológicos (variación en profundidad de los diferentes depósitos) y geotécnicos (caracterización geomecánica de los diferentes materiales), que permiten un adecuado modelamiento numérico de la zona que se pretende estudiar. Las anteriores variables son necesarias para la obtención de perfiles geotécnicos que serán utilizados posteriormente en los análisis de equilibrio límite. En este orden de ideas se definieron once perfiles geotécnicos, los cuales se definieron basados en los registros de los apiques realizados en la zona de estudio denominadas: SECCIÓN A-A', SECCIÓN B-B', SECCIÓN C-C', SECCIÓN D-D', SECCIÓN E-E', SECCIÓN F-F', SECCIÓN G-G', SECCIÓN H-H', SECCIÓN I-I', SECCIÓN J-J' y SECCIÓN K-K', consideradas las secciones más críticas durante la fase de campo. La ubicación de estas secciones se ilustra en la Figura 2.2. Es importante aclarar que en los sectores donde se realizaron los perfiles geológicos, se caracterizan porque el mecanismo de falla es rotacional, y que en la restante zona de estudio, el mecanismo de falla es traslacional.



*Figura 2.2 Localización en planta de secciones en estudio.*

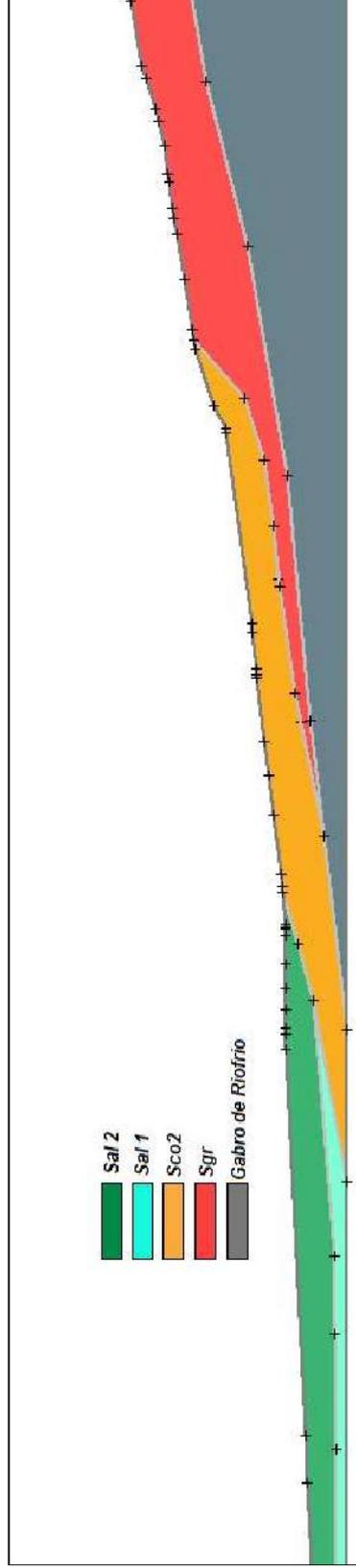
### **2.3. DISTRIBUCIÓN DE MATERIALES EN PROFUNDIDAD**

De acuerdo a la información obtenida de los registros de apiques, los resultados de laboratorio y la geología del sector, se procedió a definir tipos y espesores de los materiales, agrupándolos de acuerdo a su similitud desde el punto de vista geomecánico. Además se contó con registros de perforaciones realizadas en estudios anteriores, los cuales fueron tenidos en cuenta en la ejecución del presente estudio.

Basados en los registros de las perforaciones, apiques, líneas de refracción sísmica, y en el perfil topográfico, se construyeron los perfiles geológico-geotécnicos ilustrados en las Figuras 2.3 y 2.4. Los restantes perfiles geológico-geotécnicos se presentan en el anexo de análisis de estabilidad.



Figura 2.3 Perfil geológico geotécnico tomado de la sección B-B.



Figuras 2.4 Perfil geológico geotécnico tomado de la sección J-J.

## 2.4. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN

Definido el modelo geológico-geotécnico, se procede a la asignación de los parámetros de resistencia de las diferentes capas detectadas previamente. Es importante resaltar que estos parámetros se obtienen de los ensayos triaxiales y de corte directo, presentados en el capítulo de exploración y ensayos de laboratorio (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1** Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos

DESCRIPCIÓN	$\phi'$ (°)	$c'$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$g$ (Gr/cm <sup>3</sup> )
Llanura aluvial del río Riofrío (Sal1)	22.8	0.2	1.84
Abanicos intermedios (Sal 2)	35	1.6	1.36
Suelos Coluviales (Sco)	14	0.1	1.91
Suelo residual del gabro de Riofrío (Srg)	33.4	0.13	1.63

## 2.5. MECANISMOS DE FALLA MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE

Dentro de la zona de estudio se identificaron básicamente dos mecanismos de falla predominantes en el municipio de Riofrío: falla traslacional y falla rotacional. A continuación se presentan las bases teóricas de los mecanismos identificados, para posteriormente entrar a realizar los respectivos análisis y poder de esta manera obtener el mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa.

### 2.5.1. Falla Planar en Talud Infinito

Este mecanismo de falla corresponde a movimientos del terreno relativamente superficiales paralelos al talud y cuyo espesor en general no supera los dos metros. El análisis de estabilidad se analiza para dos condiciones, en primer lugar para talud parcialmente saturado (expresión 1) y en segundo lugar para talud parcialmente saturado con sismo (expresión 2). Las expresiones utilizadas para cada uno de los anteriores casos están dadas por la siguiente expresión:

#### Parcialmente saturado

$$FS = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)h \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

#### Parcialmente saturado y sismo

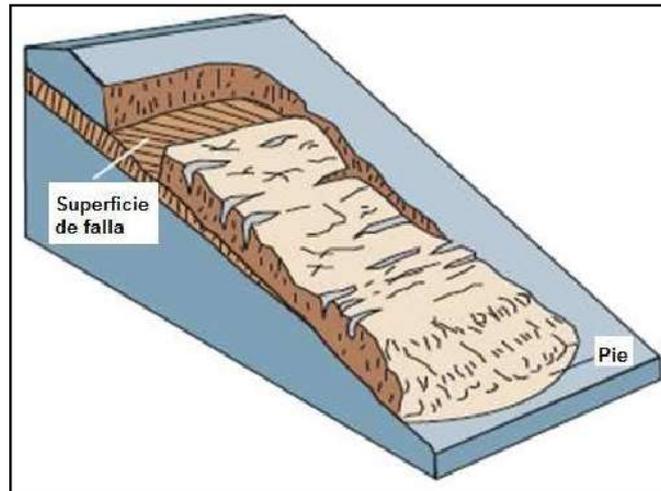
$$FS = \frac{c' + (\gamma \cos^2 \beta - \alpha h \gamma \sin \beta \cos \beta - m\gamma_w h \cos^2 \beta) \tan \phi'}{\gamma h \sin \beta \cos \beta + \alpha \gamma \cos^2 \beta} \quad (2)$$

Donde:

$c'$  = intercepto de cohesión

$\phi'$  = ángulo de fricción  
 $\beta$  = inclinación del terreno  
 $\alpha$  = coeficiente de aceleración horizontal  
 $h$  = espesor de la capa de suelo  
 $m$  = factor que varía entre 0 y 1. (0 = talud seco, 1=talud saturado)  
FS = Factor de seguridad

La anterior expresión fue programada en ARcGis, para talud saturado, talud parcialmente saturado y sismo. Los resultados de dichos análisis se presentan en las secciones subsecuentes, y serán plasmados en el mapa de amenaza.

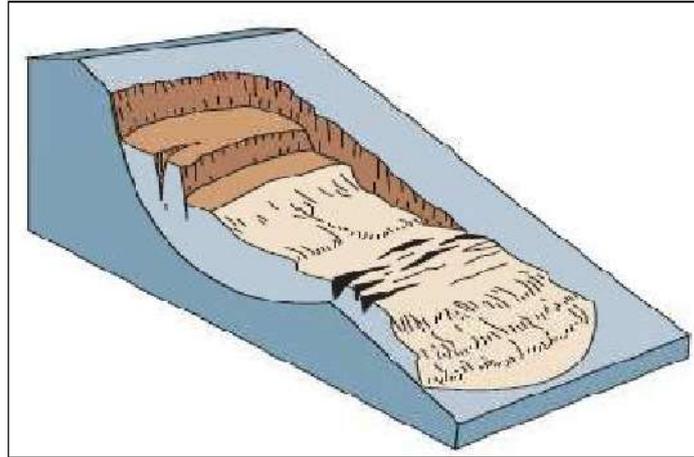


*Figura 2.5 Tipos de fallas traslacionales.*

### **2.5.2. Falla Rotacional**

En este tipo de falla el movimiento del talud ocurre a lo largo de una superficie de falla curva, la cual forma una traza que se puede asimilar a una circunferencia, aunque pueden existir formas algo diferentes, en las que por lo general influye la secuencia geológica local, el perfil estratigráfico y la naturaleza de los materiales. El movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento, y el centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento (ver Figura 2.6).

Este tipo de falla ocurre por lo general en materiales arcillosos homogéneos o en suelo cuyo comportamiento esté regido básicamente por su fracción arcillosa. Por lo común afectan en zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor cuanto mayor sea la pendiente.



*Figura 2.6* Bloque diagrama de la falla rotacional.

Estos análisis de estabilidad se realizaron con el programa SLIDE (Rocscience, 2003), asumiendo que el mecanismo de falla es rotacional. Debido a que el método de análisis es iterativo, no es posible programarlo en la plataforma del SIG.

La metodología seguida para este tipo de análisis involucró las siguientes actividades:

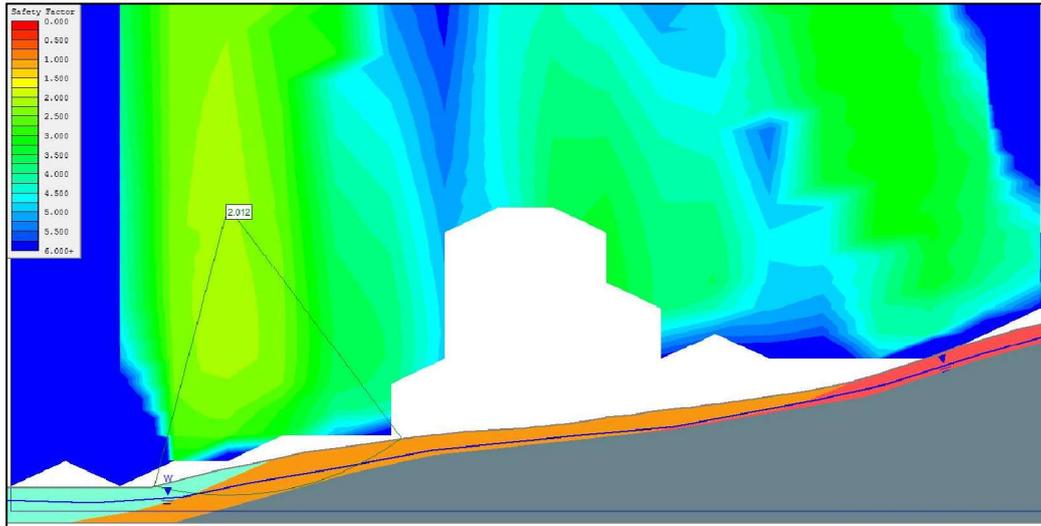
- Definición del modelo Geológico-Geotécnico.
- Asignación de parámetros de resistencia a los diferentes estratos definidos en el modelo geológico-geotécnico (obtenidos previamente en los ensayos de laboratorio).
- Definición de las condiciones de frontera. Es decir, definición y ubicación de las cargas externas transmitidas por las estructuras y posición del nivel freático.
- Análisis de estabilidad para la condición actual.
- Análisis de estabilidad para la condición futura con sismo y lluvia.
- Análisis de estabilidad para la condición futura con medidas de mitigación.

De los anteriores análisis, la condición futura con sismo y lluvia corresponderá básicamente a los resultados del mapa de amenaza. Para tal fin se generaron 2000 superficies de falla circulares procediéndose posteriormente a escoger las diez superficies de falla más críticas. Estos análisis serán utilizados en la calibración del mapa de amenaza (ver Anexo 2.1 “Análisis por secciones falla rotacional”). Para efectos de análisis, a continuación se presentan los resultados obtenidos para dos secciones típicas (C-C’ y F-F’).

#### Resultados Análisis Sección C-C’

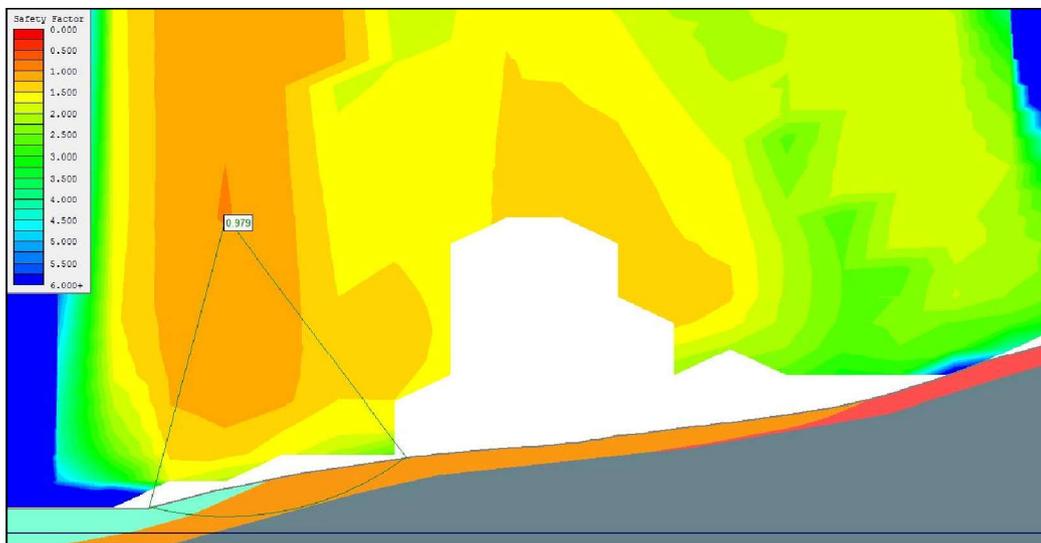
Para todas las secciones se realizaron los análisis de estabilidad para los tres escenarios de amenaza que se presentan en la próxima sección, es decir, talud parcialmente saturado sin sismo, talud seco con sismo y talud parcialmente saturado con sismo. De los análisis de esta sección se destacan los siguientes aspectos:

- Para el caso de talud parcialmente saturado sin sismo, se obtiene que el talud es estable, aún en la parte superior donde la pendiente es más fuerte. (Figura 2.7).

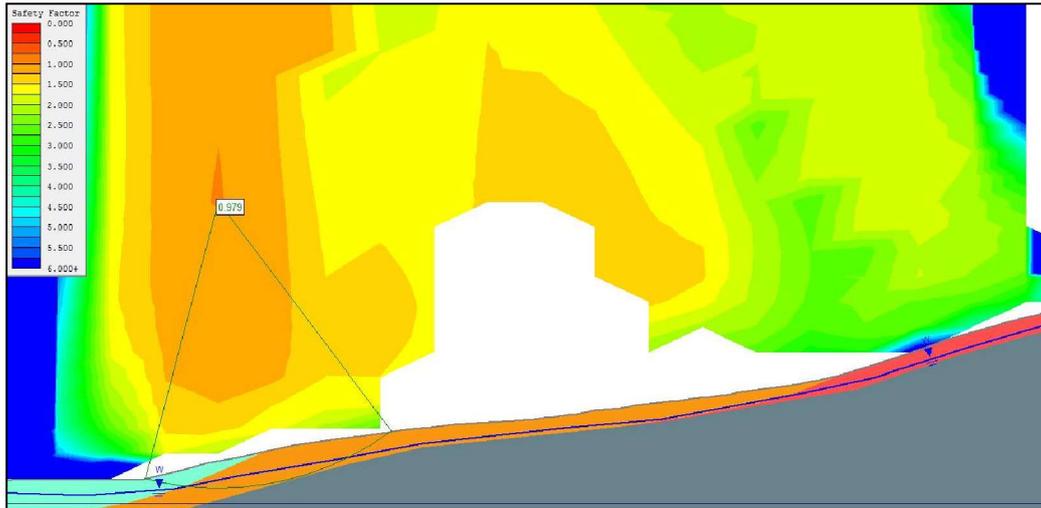


*Figura 2.7* Análisis de equilibrio límite, sección C-C', talud parcialmente saturado sin sismo.

- Como se puede observar en la Figura 2.8, para la condición de talud seco y con sismo, el talud falla en el evento de un sismo en época de verano.
- En la Figura 2.9 se presenta la condición de talud parcialmente saturado con sismo, notándose que para esta condición el talud también fallará.
- Como se desprende de las Figuras 2.8 y 2.9, el efecto del agua no alcanza para llevar a la falla al talud. Es importante destacar que este análisis se realizó para talud parcialmente saturado.



*Figura 2.8* Análisis de equilibrio límite, sección C-C', talud seco con sismo.

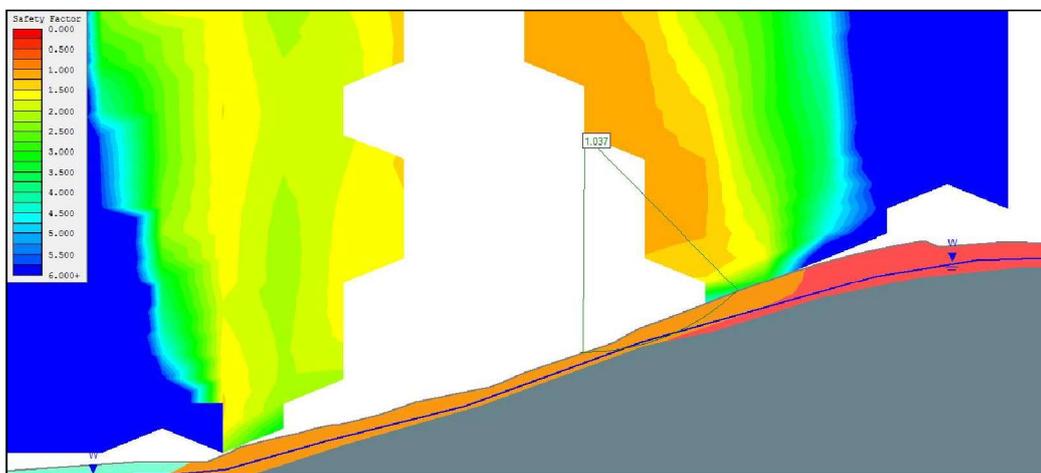


*Figura 2.9 Análisis de equilibrio límite, sección C-C', talud parcialmente saturado con sismo.*

### Resultados Análisis Sección F-F'

Esta sección atraviesa parte de la zona de acumulación de fenómenos en remoción en masa en la parte norte de la cabecera del municipio cerca al alto de la virgen, destacándose los siguientes aspectos:

- De la Figura 2.10 se concluye que el talud para la condición parcialmente saturado sin sismo es inestable con un factor de seguridad de 1.037, esto se puede además constatar con las visitas de campo realizadas, donde se identificó ésta como una zona de acumulación de material proveniente de la parte superior del talud.



*Figura 2.10 Análisis de equilibrio límite, sección F-F', talud parcialmente saturado sin sismo.*

- Como se observa en las Figuras 2.11 y 2.12, para las condiciones de talud seco con sismo y parcialmente con sismo, el talud es inestable, manteniéndose un factor de seguridad de 0.66.



*Figura 2.11 Análisis de equilibrio límite, sección F-F', talud seco con sismo.*



*Figura 2.12 Análisis de equilibrio límite, sección F-F', talud parcialmente saturado con sismo.*

### **3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS**

### 3. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR ESCENARIOS

Para el análisis determinístico en función del factor de seguridad, se considerarán diferentes escenarios de acuerdo con la profundidad del nivel freático y la aceleración del terreno.

Para simular el efecto de lluvias detonantes correspondientes a un periodo de retorno de 25 años, el modelo toma el nivel freático a nivel superficial (condición saturada). De la misma manera, para simular el efecto de lluvias detonantes correspondientes a un periodo de retorno de 10 años, el modelo tomará el nivel freático a niveles intermedios del espesor de suelo movilizado (condición parcialmente saturada).

Teniendo presente el efecto adverso de los agentes detonantes lluvia y sismo, se generaron tres escenarios, en los que se tiene en cuenta de manera independiente el efecto del agua, el sismo y finalmente el efecto combinado de los anteriores agentes externos. En la Tabla 3.1, se ilustra los escenarios propuestos para la generación del mapa de amenazas.

*Tabla 3.1* Escenarios de análisis para la estimación de factores de seguridad.

ESCENARIO	CONDICION	SISMO	Aa
1	Parcialmente saturado	Sin sismo	
2	Seca	Con sismo	0.20
3	Parcialmente saturado	Con sismo	0.20

#### 3.1. FUERZA SÍSMICA

En la Norma Sismo resistente vigente en el territorio nacional, (NSR-98), se hizo una zonificación sísmica proporcionando para los diferentes municipios de Colombia, un valor aproximado del Coeficiente de Aceleración (Aa). Para el presente estudio, en el Departamento del Valle del Cauca, el valor de dicho coeficiente es de 0.25.

En la Resolución 227/2004, emitida por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias – DPAAE., por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C, se especifica que la aceleración crítica a ser considerada en los análisis de tipo pseudo-estático no podrá ser menor a  $\frac{2}{3}$  de la aceleración máxima. Por tanto en este caso se tomo un  $Aa= 0.20$ , pero se realizaron evaluaciones de sensibilidad variando dicho valor desde 0 a 0.3. Existen diversos criterios para la escogencia de este factor, pero creemos que los  $\frac{2}{3}$ , es un valor mundialmente aceptado.

Teniendo en cuenta lo anterior se definieron una serie de rangos que permitieron subdividir los sectores en zonas de amenaza baja, media y alta, tal como se ilustran en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2** Rangos del Factor de Seguridad para definir el nivel de amenaza.

AMENAZA	RANGO F.S.
BAJA	> 1.2
MEDIA	1 – 1.2
ALTA	< 1

Para la obtención del mapa de amenazas, es necesario tener presente que durante la fase de campo (Geología), se detectó que en el frente montañoso hacia la parte norte del municipio el mecanismo de falla es de tipo rotacional, mientras que para el resto de la zona de estudio el mecanismo de falla imperante es de tipo traslacional. Lo anterior implicó que los análisis realizados fueran distintos, de manera que para un sector se realizaron análisis de estabilidad para falla circular, mientras que para el otro fue falla planar en talud infinito.

### 3.1.1. Escenario 1. Talud parcialmente Saturado sin Sismo

Esta condición se puede presentar durante lluvias fuertes y prolongadas, que ocasionen un rápido ascenso del nivel freático, así como la saturación del terreno.

Teniendo en cuenta que el municipio cuenta con una buena cobertura del suelo ya sea por cultivos como por asentamientos, para esta condición la amenaza es casi en su totalidad baja (98.5%) con una pequeña zona hacia la parte alta del alto de la virgen en amenaza media (1.5%) (Ver Figuras 3.1) Figura 3.2 y Mapa 3.1: Mapa de Escenario 1.



**Figura 3.1** Distribución porcentual de amenaza, escenario 1.



### 3.1.2. Escenario 2. Talud Seco con Sismo

Esta condición implica la generación de un sismo en verano, en la que el régimen de lluvias es mínimo, y el nivel freático se encuentra abatido. Para efecto de análisis se asume un coeficiente de aceleración horizontal de 0.2g. Para este escenario las zonas afectadas se encuentran fuera del perímetro urbano y de la zona de expansión, lo cual no pone en riesgo al municipio por fenómenos de remoción en masa, sin embargo es importante destacar que se pueden presentar movimientos en masa hacia la parte norte sobre la carretera que de Riofrío conduce a Trujillo (Ver Figura 3.4 y Mapa 3.2: Mapa de Escenario 2). La Figura 3.3 muestra la amenaza para el escenario 2 en porcentaje.



Figura 3.3 Distribución porcentual de la amenaza, escenario 2.

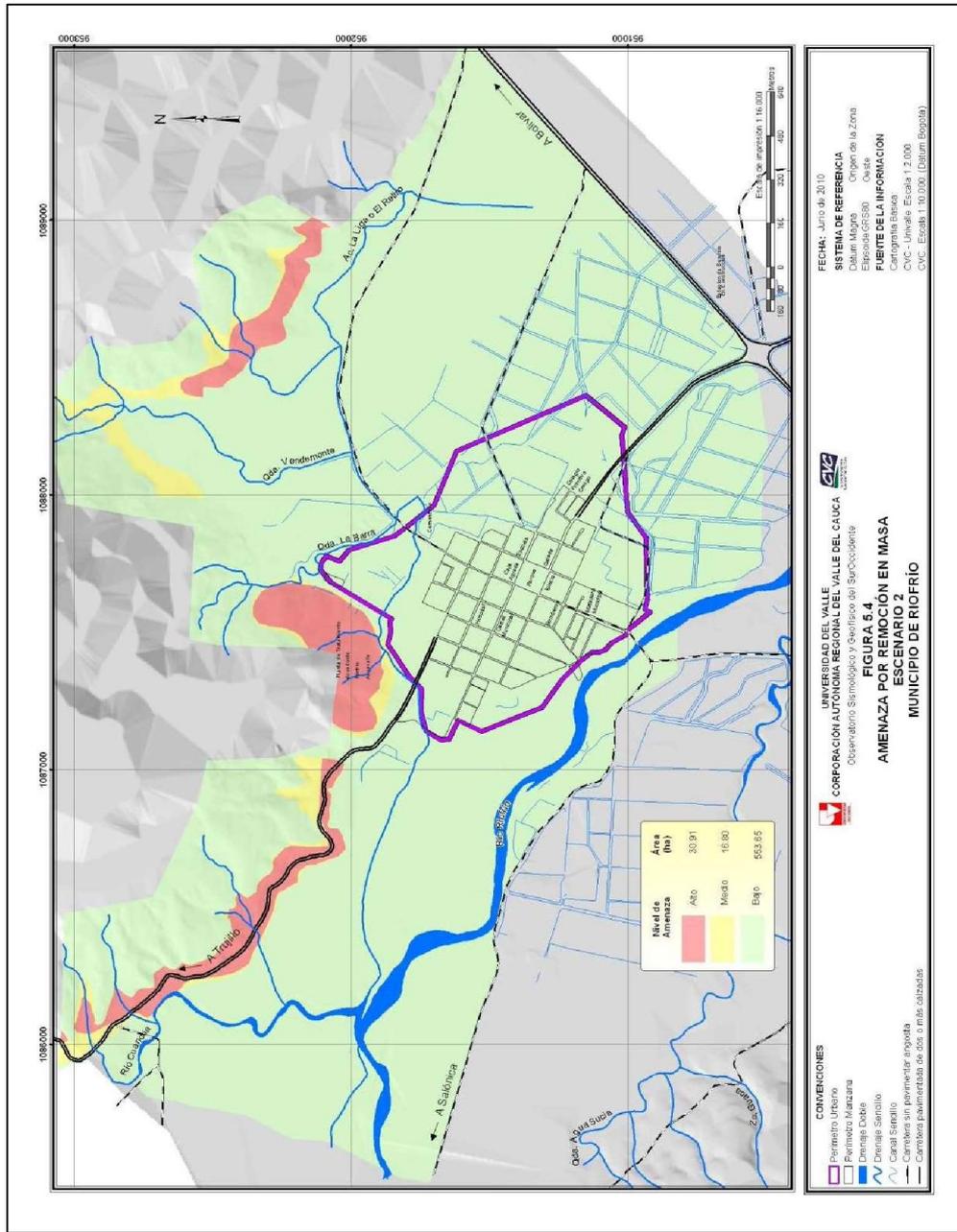


Figura 3.4 Mapa de amenaza, escenario 2.

### 3.1.3. Escenario 3. Talud parcialmente Saturado con Sismo

En este escenario se asume que se presente un sismo durante un periodo de lluvias fuertes y prolongadas. Al igual que para el escenario 2, las áreas afectadas, corresponden a la zona alta al norte del municipio y los porcentajes de amenaza son muy similares (Figura 3.3 y 3.5). El mapa del escenario 3 corresponde a la Figura 3.6 y al Mapa 3.3.



*Figura 3.5* Distribución porcentual de la amenaza, escenario 3.



Teniendo en cuenta los resultados de los anteriores escenarios, se destacan los principales aspectos de los niveles de amenaza, así como el significado para cada uno de los escenarios:

**AMENAZA BAJA:** Corresponde a los sectores donde en general el terreno es estable por fenómenos de remoción en masa ante agentes externos. Estas áreas corresponden a zonas planas, las de menor pendiente, urbanizadas y con una cobertura vegetal bastante importante. En el municipio de Riofrío corresponde a la gran parte del área de estudio, ubicada en la zona plana y en donde en la actualidad existen diferentes cultivos y asentamientos. Cubre en su totalidad el casco urbano y la zona de expansión.

**AMENAZA MEDIA:** Estos sectores se caracterizan por presentar pendientes intermedias, y buena cobertura vegetal, ubicadas en las zonas próximas a sectores de amenaza alta por remoción en masa.

**AMENAZA ALTA:** Corresponden a sectores de pendientes medias a fuertes, estas zonas se caracterizan por la falla del talud, por efecto de algunos de los agentes externos previamente descritos o por la combinación de ellos. Se presenta en la zona montañosa del municipio, alejado del casco urbano y la zona de expansión. Se recomienda restringir el uso del suelo en estos sectores. De igual manera prohibir el sobrepastoreo generado por la ganadería intensiva. Con el fin de evitar que hacia el futuro el municipio se vea afectado por eventuales problemas de inestabilidad, se recomienda adoptar dentro del POT, estas áreas como zonas de protección.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- Según los análisis de estabilidad realizados, se concluye que el municipio de Riofrío se encuentra en una zona de amenaza baja por fenómenos de remoción en masa, sin embargo cada destacar que existen unas zonas hacia la parte alta del municipio que se encuentra en amenaza alta y el mecanismo de falla es rotacional.
- Se debe tener en cuenta que aunque las zonas de amenaza alta y media se encuentran alejadas del casco urbano y de la zona de expansión, es recomendable realizar un estudio más detallado hacia la zona norte occidental, sobre la vía que de Riofrío conduce a Trujillo en donde se pueden presentar fenómenos de remoción en masa.
- Si bien la zona de estudio no presenta amenaza por remoción en masa, se recomienda ubicar las zonas de expansión hacia la parte baja del municipio, teniendo en cuenta el estudio de amenaza por inundación contemplado en este contrato.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

## 5. BIBLIOGRAFÍA

**ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA**, 1998 Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.

**DAHAL, R.K., HASEGAWA, S., YAMANAKA, M., NONOMURA, A., DHAKAL S., PAUDYAL P**, 2008. Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology* 102, 496 - 150.

**FELL, R., COROMINAS, J., BONNARD, C., CASCINI, L., LEROI, E., SAVAGE, W.** 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning - On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. *Engineering Geology* 10 (3-4), 99-111.

**NEUHAUSER, B., TERHORST, G.**, 2007. Landslides susceptibility assessment using weights of evidence applied to study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany), *Geomorphology* 86, 12-24.

**Rocscience** – 2001. RocPlane, Planar sliding stability analysis for rock slopes. Reference Manual.

**Felícísimo, A.M.** (1992) "Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en las ciencias ambientales". Tesis doctoral , Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Universidad de Oviedo.

**Santacana, N** (2001) "Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat" Tesis doctoral, Universidad politecnica de Cataluña.

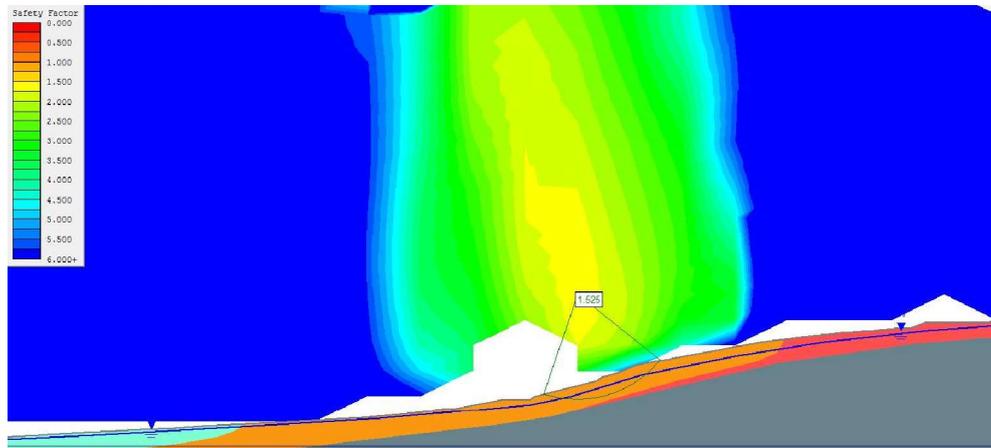
**Rocscience Inc**, 2003, SLIDE – 2D Limit equilibrium slope stability for rock and soil slope. User's Guide. Canada.

## **6. ANEXOS**

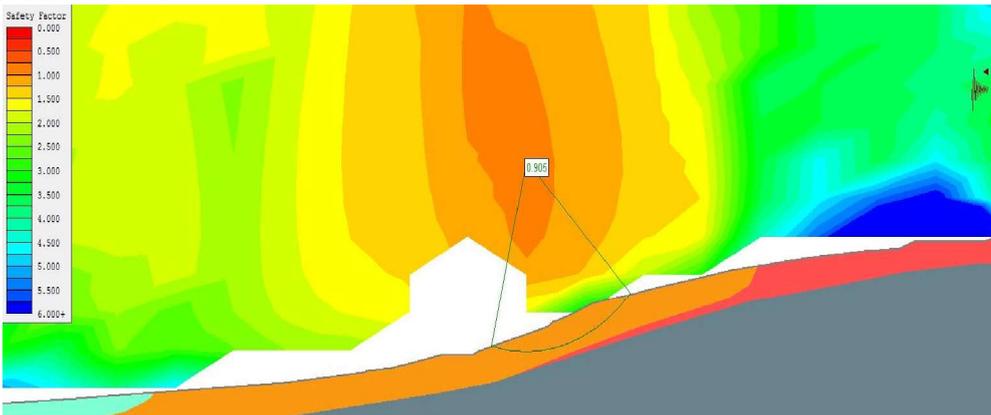
## **Anexo 2.1: Análisis por Secciones Falla Rotacional**

## PERFIL A-A'

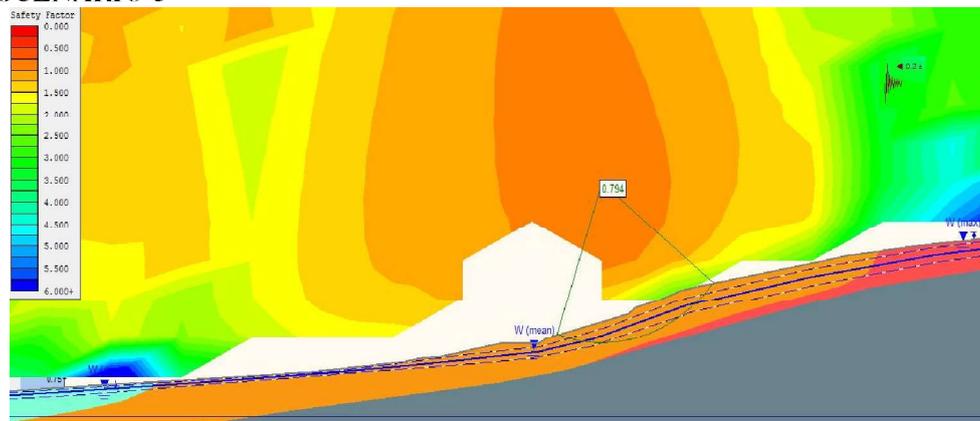
### ESCENARIO 1



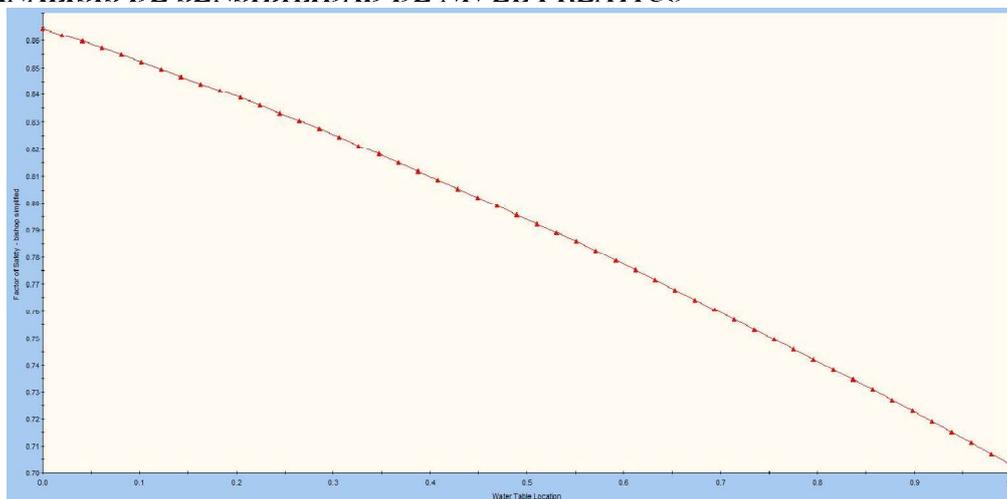
### ESCENARIO 2



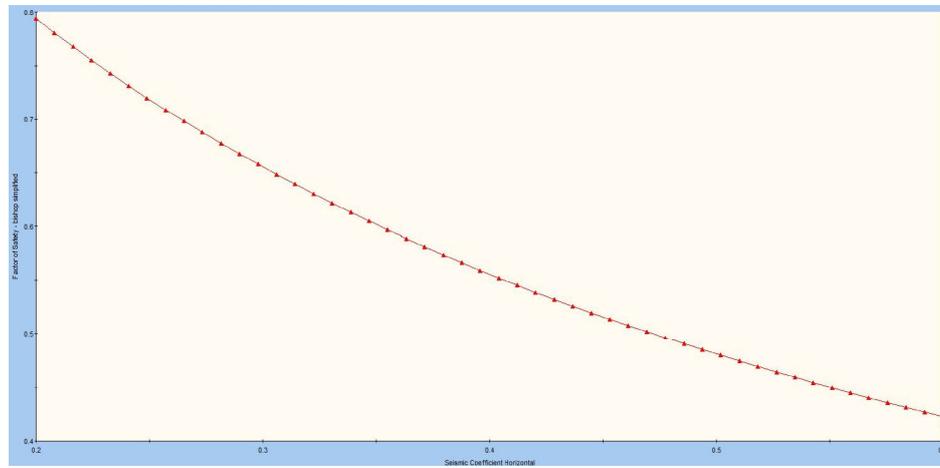
### ESCENARIO 3



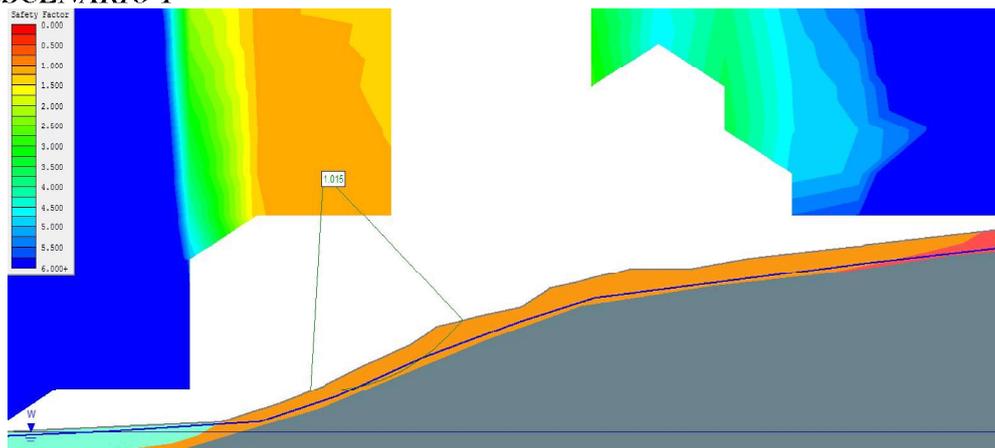
### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO



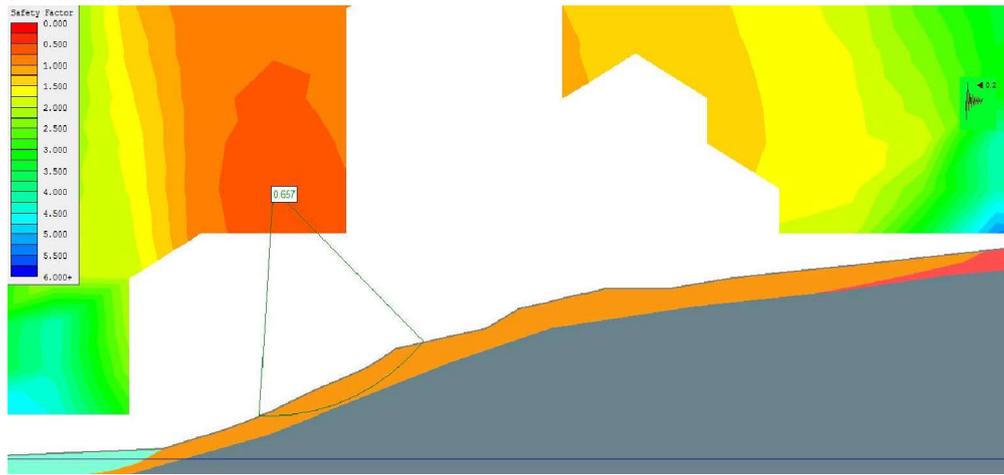
### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE $A_a$



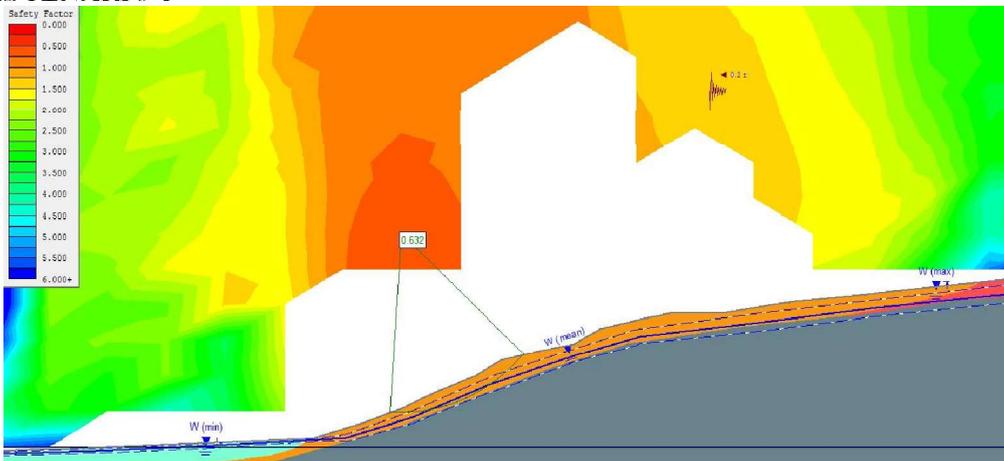
### PERFIL E-E' ESCENARIO 1



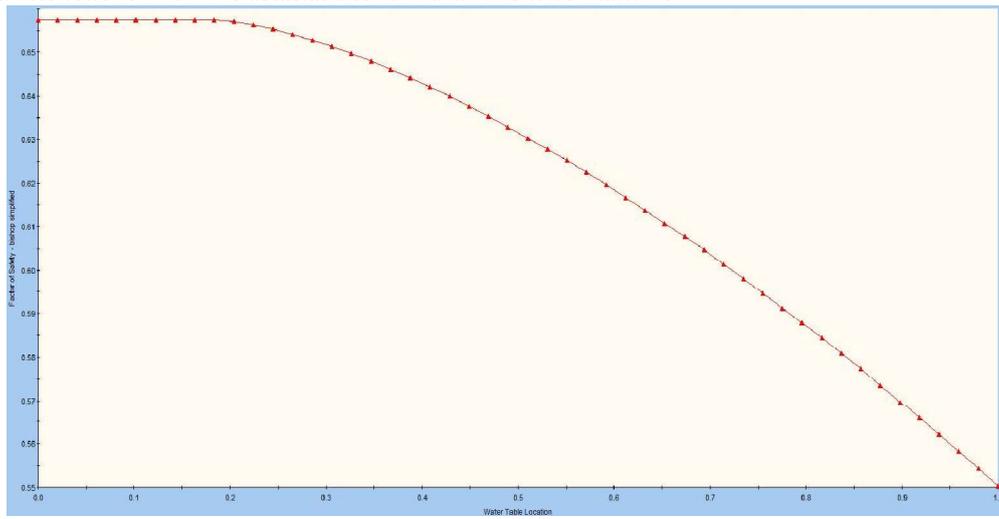
### ESCENARIO 2



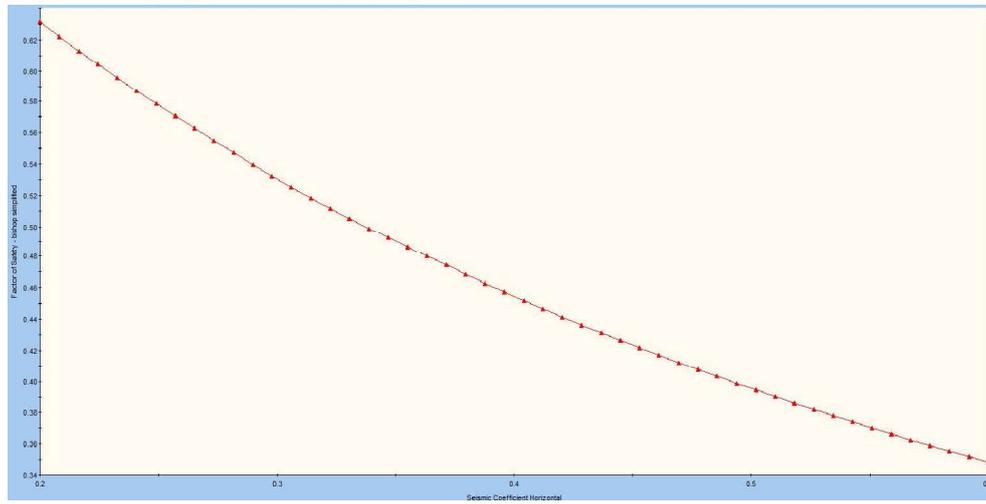
### ESCENARIO 3



### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO

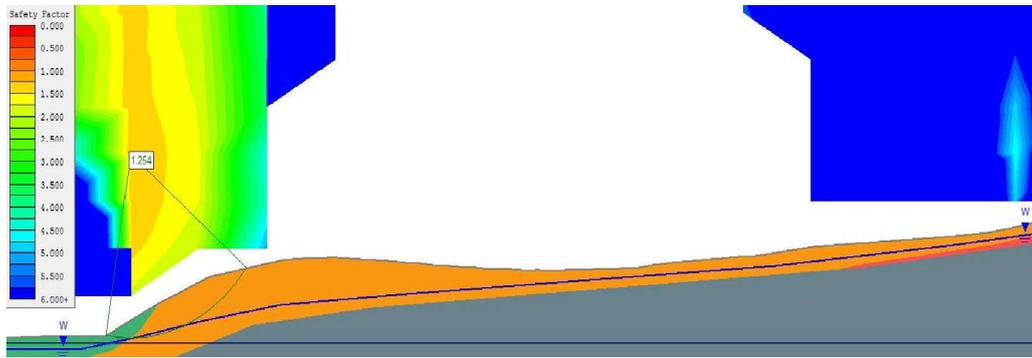


### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE $A_a$

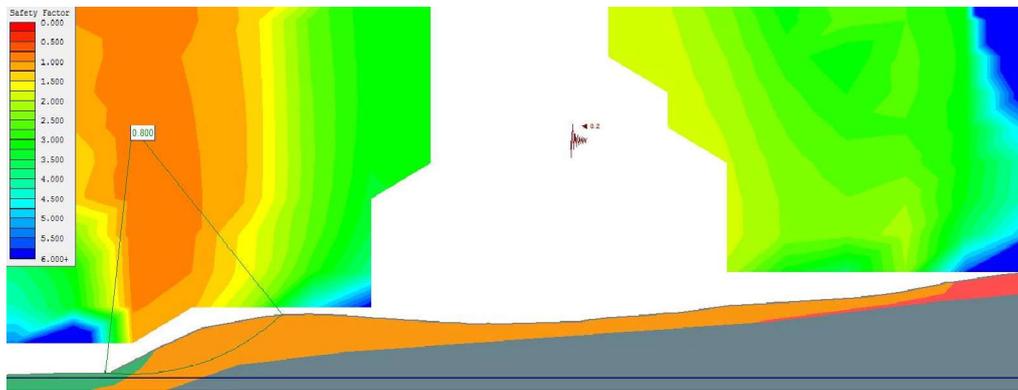


## PERFIL I-I'

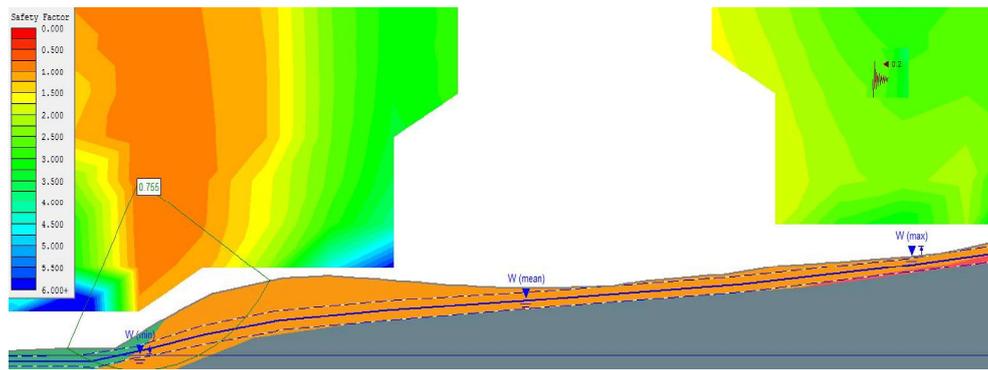
### ESCENARIO 1



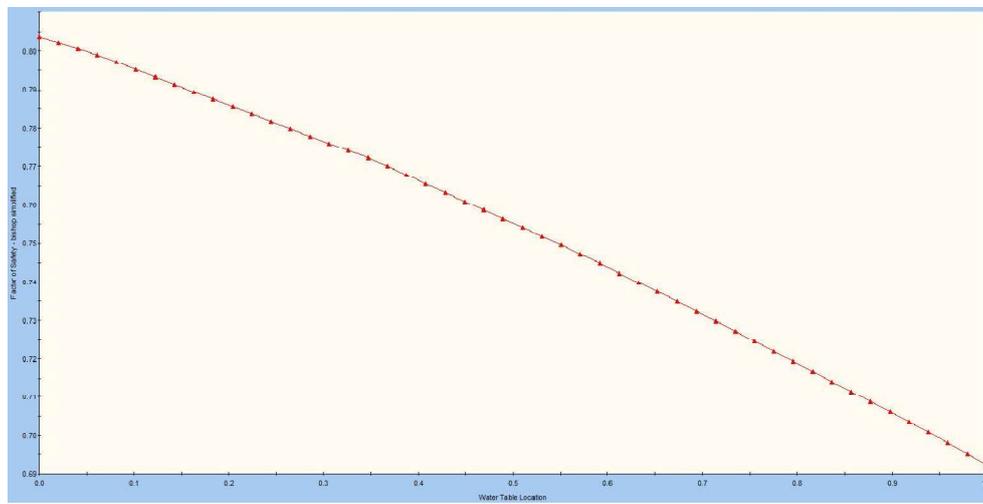
### ESCENARIO 2



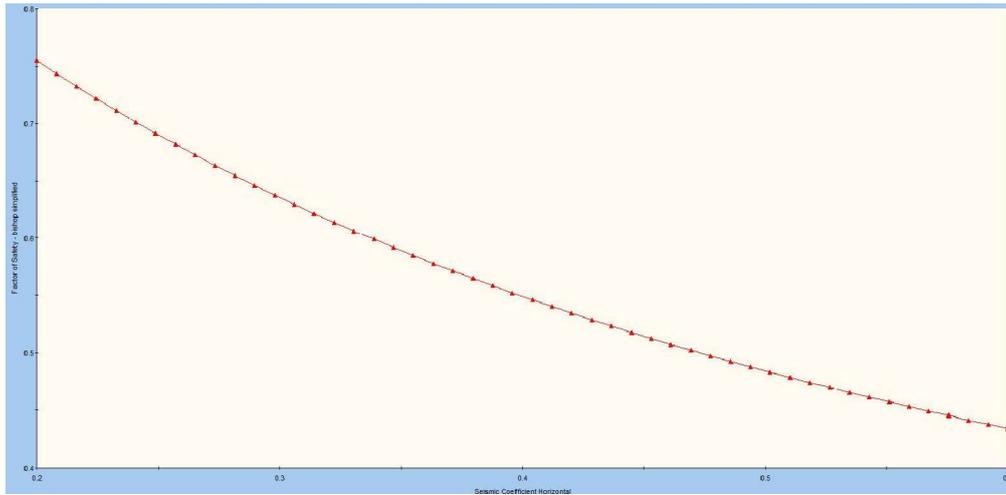
### ESCENARIO 3



### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO

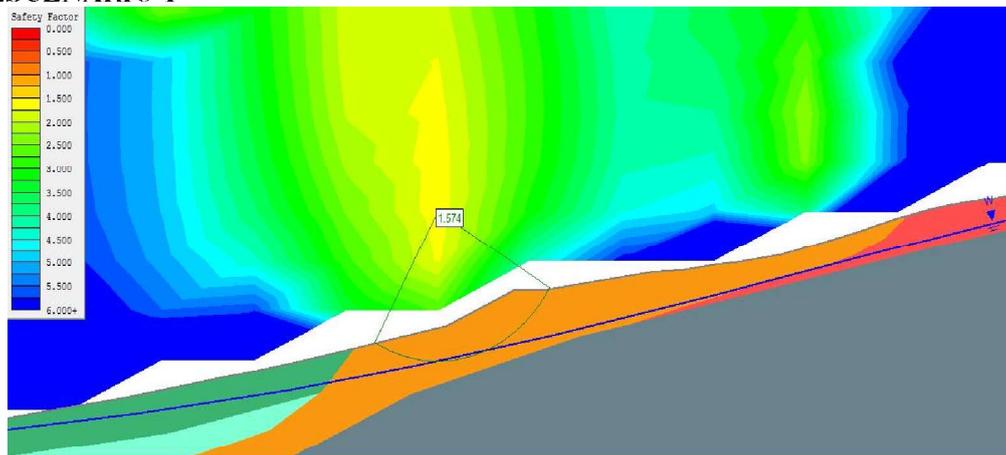


### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE $A_a$

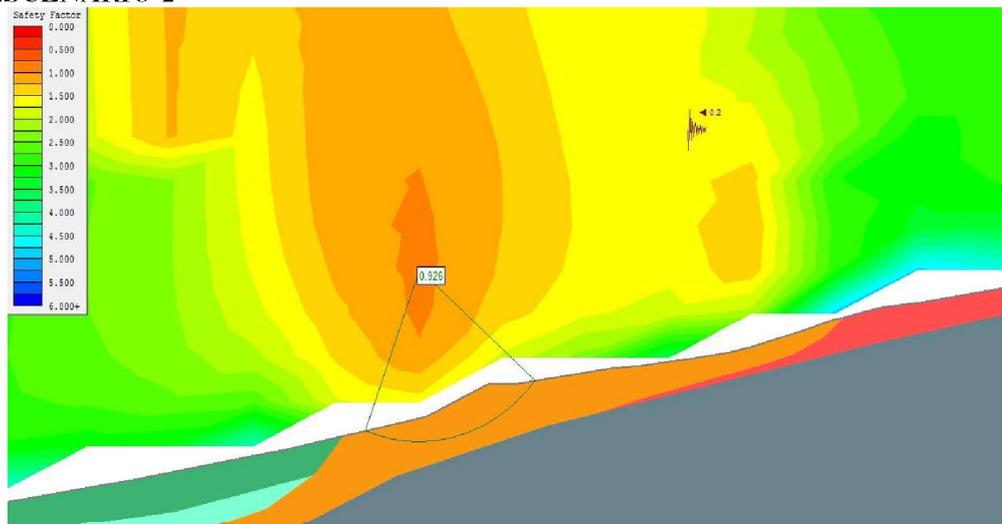


### PERFIL J-J'

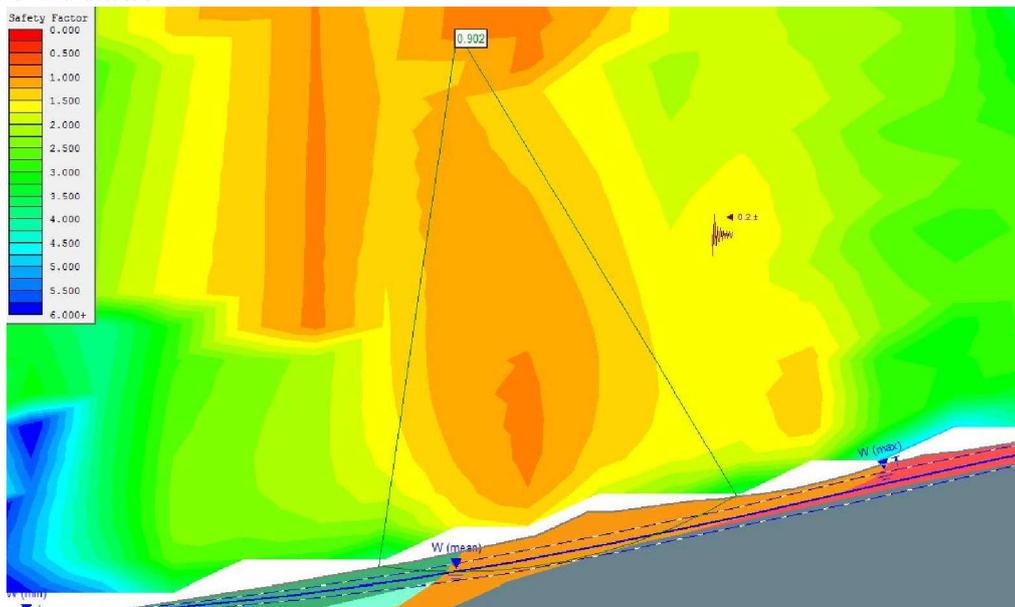
#### ESCENARIO 1



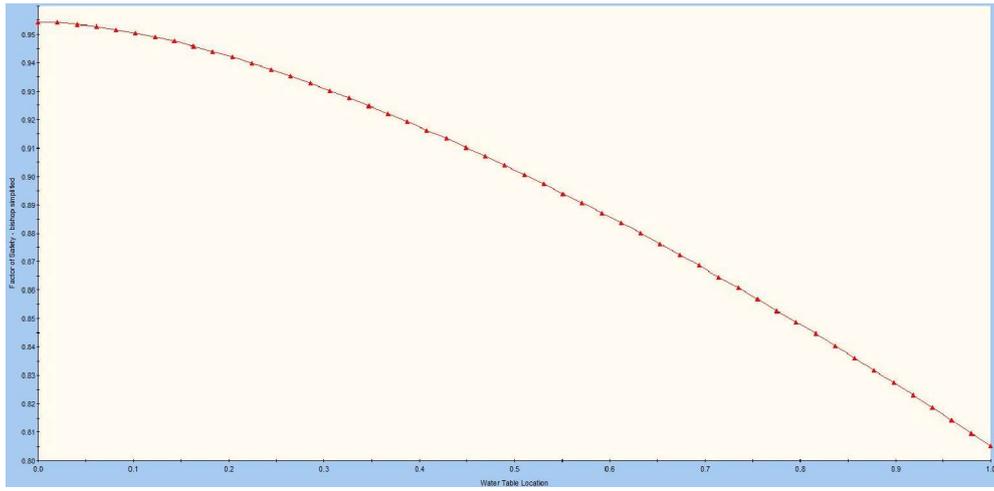
### ESCENARIO 2



### ESCENARIO 3



### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE NIVEL FREATICO



### ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE $A_u$

