000001

1ª copia

Alcaldía Mayor
de Santa Fe de Bogotá, D.C.

UPES

Unidad de Prevención y Atención de Emergencias

ZONIFICACIÓN POR INESTABILIDAD DEL TERRENO PARA DIFERENTES LOCALIDADES EN LA CIUDAD DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ D.C.

ZONIFICACION DE VULNERABILIDAD Y RIESGO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LAS LOCALIDADES DE CIUDAD BOLIVAR, RAFAEL URIBE, SAN CRISTOBAL, SANTAFE, CHACINERO, USAQUEN Y SUBA

INGEOCIM Ltda.
Ingenieros Consultores

SANTAFÉ DE BOGOTÁ, D.C., OCTUBRE DE 1.998

ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LAS LOCALIDADES DE CIUDAD BOLIVAR, RAFAEL URIBE, SAN CRISTOBAL, SANTAFÉ, CHAPINERO, USAQUÉN Y SUBA

1. INTRODUCCIÓN

Como parte del Contrato No. 1314-107/98 suscrito entre el Fondo para Prevención y Atención de Desastres de Santafé de Bogotá (FOPAE) e INGEOCIM LIMITADA, a continuación se presenta el informe de zonificación de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa para las localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe, San Cristóbal, Santafé, Chapinero, Usaquén y Suba.

2. AMENAZA

La determinación de la amenaza, entendida como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con una intensidad dada, es parte fundamental para determinar el riesgo. Para ello se realizaron diversos trabajos, los cuales se explican en detalle en sus respectivos informes. En forma resumida, se puede decir que la zonificación de amenaza se dividió en dos etapas:

- En una primera etapa, se halló la amenaza a corto plazo o "actual", determinada por los procesos por remoción en masa identificados mediante fotointerpretación y visitas de campo.
- Y una segunda etapa, que consistió en determinar la amenaza a mediano plazo, con un período de retorno promedio del orden de 10 años, para lo cual se realizó la zonificación utilizando los métodos semicutantitativo propuesto por Ramírez y de Taludes Naturales (MTN) propuesto por Shuk.

Es importante resaltar que, en el mapa de amenaza definitivo se presenta ya el cruce de los dos mapas mencionados anteriormente.

2.1. Amenaza a corto plazo

2.1.1 Identificación de procesos

Como parte inicial de los trabajos, con base en trabajos de fotointerpretación y de campo, se realizó el inventario de procesos actuales por fenómenos de remoción en masa (ver informe correspondiente). Los procesos identificados se clasificaron en las siguientes categorías:

Tabla 1. Clasificación de procesos cartografiados.

Tipo de proceso	Símbolo
Caída de rocas en escarpes naturales	Cren
Caída de rocas en escarpes de origen antrópico (canteras, corte de vías, etc.)	Crea
Deslizamiento rotacional en suelo	Drs
Deslizamiento traslacional en suelo	Dts
Deslizamiento traslacional en roca	Dtr
Deslizamiento compuesto (traslacional y rotacional en suelo)	Dcp
Deslizamiento rotacional en material intermedio	Dri
Deslizamiento traslacional en material intermedio	Dti
Flujo en suelos	Fls
Flujos en material intermedio	Fli

Los materiales intermedios son los saprolitos y los depósitos coluviales.

2.1.2. Solicitaciones

A cada uno de los procesos identificados se le asociaron dos (2) posibles áreas de afectación (zona A y zona B). Igualmente, a cada zona se le asignó la solicitación característica, de acuerdo con la metodología propuesta para la evaluación de la vulnerabilidad por fenómenos de remoción en masa.

Las solicitaciones asociadas a cada uno de los fenómenos identificados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Solicitaciones características según el tipo de fenómeno.

Tipo de fenómeno	Tipo de solicitación zona A	Tipo de solicitación zona B
Deslizamientos	Rapidez del movimiento	Presiones laterales
Caída de rocas	Desplazamientos verticales	Impactos

2.1.3. Probabilidades de ocurrencia

Dependiendo de la actividad de cada fenómeno, se asigna la probabilidad cualitativa de ocurrencia, de acuerdo con lo consignado en la siguiente tabla.

Tabla 3. Probabilidad de ocurrencia de la amenaza según la actividad del proceso.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	PROBABILIDAD
Aa	Proceso Activo	Muy Alta
Ac	Proceso Colapsado	Media
Ai	Proceso Incipiente	Alta
E	Proceso Estabilizado	Baja

Para la valoración de la probabilidad en términos cuantitativos, se utilizó la valoración por medio de conjuntos difusos, tal como se muestra en la siguiente figura.

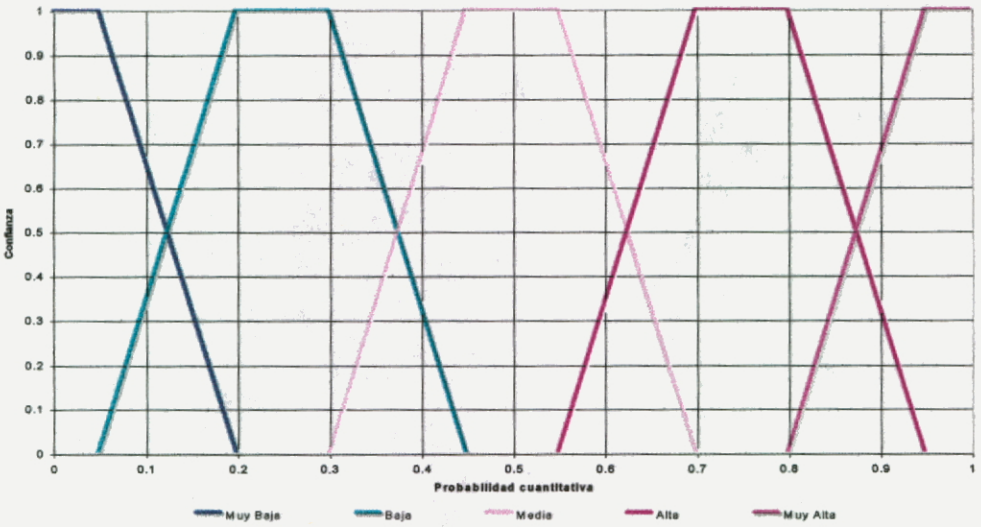


Figura 1. Valoración cuantitativa de la probabilidad de amenaza utilizando conjuntos difusos.

De acuerdo con lo presentado en el gráfico anterior, se determinaron las probabilidades cualitativas de ocurrencia de la amenaza así:

Tabla 4. Probabilidades cuantitativas de la amenaza utilizadas en los cálculos.

Probabilidad Cualitativa	Confianza	Pr Máxima	Pr Mínima
Muy Alta	0.5	1.000	0.875
Alta	0.5	0.875	0.625
Media	0.5	0.625	0.375
Baja	0.5	0.375	0.175
Muy Baja	0.5	0.125	0.000

2.2. Amenaza a mediano plazo (período de retorno promedio de 10 años)

2.2.1. Probabilidades de falla

En resumen, los trabajos para determinar la amenaza a mediano consistieron en determinar zonas con probabilidades (o factores de seguridad) en rangos determinados; para ello, se determinaron nueve (9) rangos de probabilidades de falla, los cuales a su vez se agruparon en cinco (5) categorías de riesgo, tal como se presenta en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5 . Probabilidades de falla de las diferentes categorías de la amenaza.

Categoría de la amenaza	Categoría Probabilidad	PR MÁXIMA	PR MINIMA
Muy Alta	1	0.957	0.731
Alta	2	0.731	0.603
	3	0.603	0.443
Media	4	0.443	0.326
	5	0.326	0.215
	6	0.215	0.121
Baja	7	0.121	0.033
	8	0.033	0.004
Muy Baja	9	0.004	0.001

2.2.2. Solicitaciones

Dada la escala de trabajo y el estado del arte del conocimiento, no fue posible determinar como en el caso anterior las zonas con solicitación determinada. Es por ello que a cada zona de amenaza se le asoció, en forma general, alguno de los dos tipos de fenómenos mencionados en la Taba 2. Es importante resaltar que, las "Caídas de Rocas", son las mismas determinadas en los procesos; las demás zonas se catalogaron en forma general como "Deslizamientos".

3. VULNERABILIDAD

3.1. Identificación de las manzanas afectadas

Una vez determinadas las posibles áreas de afectación de la amenaza (zonas A y B para la amenaza actual; y zonas de amenaza alta y muy alta para la amenaza futura), se procedió a determinar las manzanas y el porcentaje de afectación para cada uno de ellos. A cada una de estas manzanas se les asignó su tipología característica, de acuerdo con los trabajos de campo previamente realizados, y su estrato, teniendo en cuenta el mapa suministrado por el DAPD.

3.2. Vulnerabilidad social

Dependiendo del sector del DANE en que se encuentre la manzana, se le asignó el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS), de acuerdo con los resultados presentados en el informe correspondiente.

3.3. Vulnerabilidad fisica

3.3.1. Generalidades

El cálculo del índice de vulnerabilidad física (IVF) se basó en la metodología propuesta por Frédéric Leone (1996) para el daño en viviendas. En resumen, el trabajo consistió en:

- Clasificar la tipología de vivienda a nivel manzana de los barrios objeto del estudio.

- Calcular los índices de vulnerabilidad física (IVF), dependiendo del tipo de movimiento, la intensidad de las solicitaciones y las características del elemento expuesto (viviendas)

3.3.2. Tipificación de las viviendas

Para tipificar las viviendas se utilizó el criterio de Leone (1996), el cual se resume a continuación:

Tabla 6. Clasificación de la tipología de vivienda.

TIPO DE VIVIENDA	DESCRIPCIÓN
B1	Tugurios (ranchos).
B2	Casas en mampostería o prefabricadas.
B3	Casas de hasta dos niveles de buena calidad de construcción (con estructura).
B4	Casas de más de dos niveles de buena calidad de construcción (con estructura).

Además, se identificaron los sitios donde no hay viviendas vacíos como LV ("lotes vacíos"). Para efectos de los cálculos, se determinó que en estos lotes se puede ubicar algunas viviendas en estados precarios (tipo B1). Para ello se estimó una probabilidad de ocupación de 0.8 (Alta), en área del 10%.

3.3.3. Calificación de los daños

En la metodología propuesta por Leone, para calificar los daños producidos en las viviendas por fenómenos de remoción en masa se sigue al criterio del DRM (Délégation aux Risques Majeurs), el cual divide los daños en cinco (5) categorías, a saber:

Tabla 7. Clasificación de los daños según el DRM.

INTENSIDAD DE DAÑO	MODOS DE DAÑO	PORCENTAJE DE DAÑO
I	Daños ligeros no estructurales. Estabilidad no afectada	0,01 - 0,1
II	Fisuración de muros. Reparaciones no urgentes	0,2 - 0,3
III	Deformaciones importantes, fisuras en elementos estructurales	0,4 - 0,6
IV	Fracturación de la estructura, evacuación inmediata	0,7 - 0,8
V	Derrumbe parcial o total de la estructura	0,9 - 1,0

El porcentaje de daño o índice de daño (ID) lo define Leone, como:

$$ID = \frac{(Vi - Vf)}{Vi}$$

Donde,

Vi : Valor inicial del bien (antes del evento).
Vf : Valor final del bien (después del evento).

Dado que, con la información disponible para la realización del estudio, no se puede llegar al grado de detalle de la categorización anterior y aún menos a los índices de daño propuestos, se optó por simplificarlas a tres (3) niveles de tipo cualitativo:

Tabla 8. Niveles de daño utilizados en el estudio.

NIVEL DE DAÑO	INTENSIDAD DE DAÑO SEGÚN EL DRM
Bajo	I y II.
Medio	III
Alto	IV y V

3.3.4. Solicitaciones para la amenaza a corto plazo

3.3.4.1. Tipos de movimientos y solicitaciones

En forma general, los fenómenos de remoción en masa que se pueden presentar en la zona de estudio se pueden catalogar en dos (2) tipos:

- Deslizamientos de suelos o rocas y flujos de suelos.
- Caída de bloques.

El tipo de solicitaciones depende de la localización del elemento expuesto en referencia al sitio donde ocurre el fenómeno, tal como se presenta a continuación.

a) Deslizamientos de suelos o rocas y flujos de suelos

A continuación se presenta en forma esquemática la ocurrencia de este tipo de movimiento.

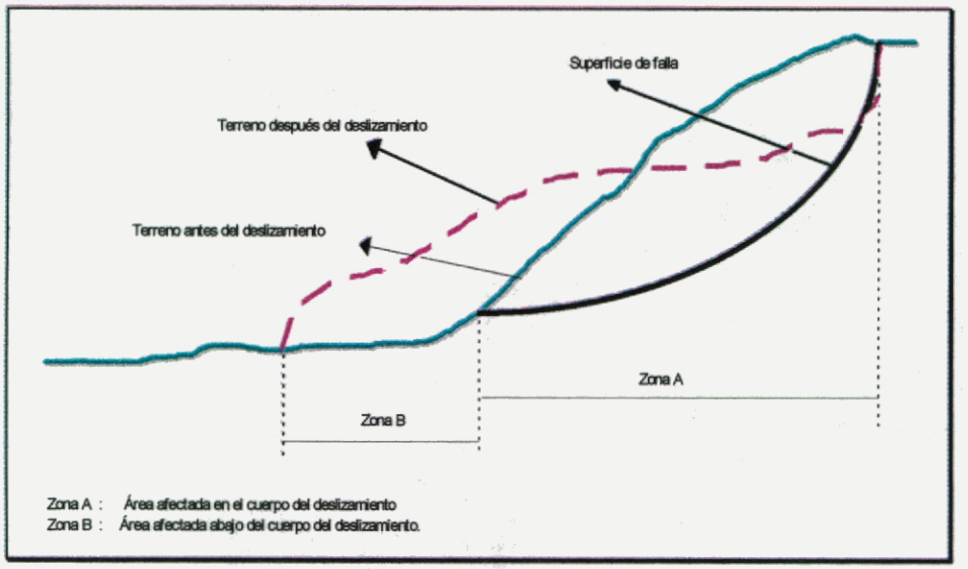


Figura 2. Esquema de deslizamientos o flujos.

Como se puede observar en la figura anterior, se pueden distinguir dos zonas. En la Zona A (en el cuerpo del deslizamiento), los daños que van a sufrir las viviendas se pueden relacionar con los desplazamientos laterales que, a su vez, dependen de la rapidez del movimiento (entre más rápido, los daños pueden ser mayores). En la zona B (abajo del cuerpo del deslizamiento), los daños de las viviendas se pueden relacionar con las presiones laterales que, igualmente, se pueden asociar con la altura que alcanza la acumulación de material contra la vivienda.

b) Caída de bloques

En seguida se presenta en forma esquemática la ocurrencia de este tipo de movimiento.

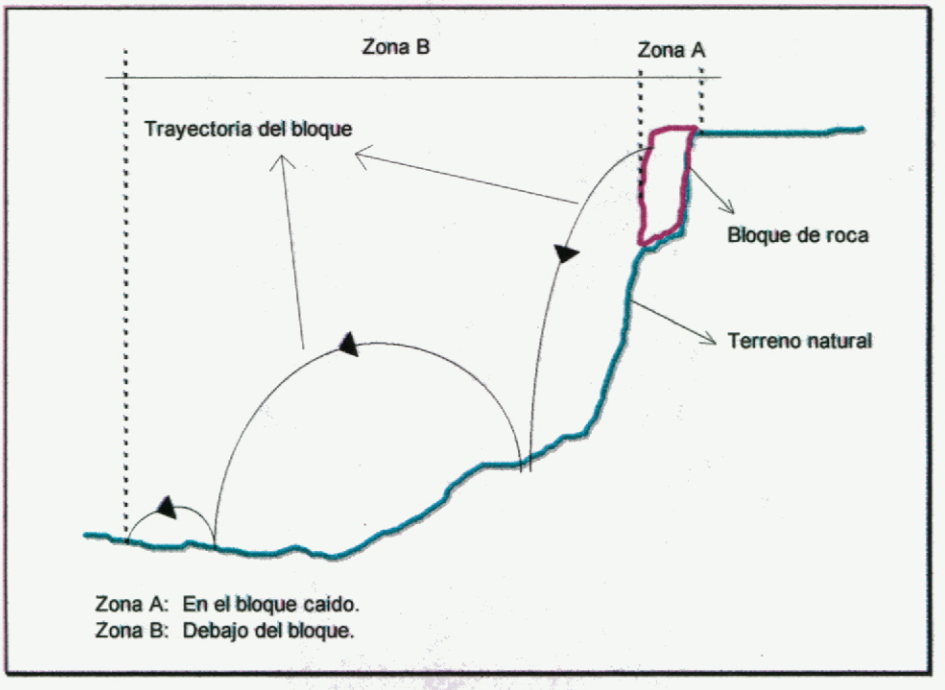


Figura 3. Esquema de caída de rocas.

De igual forma que en el caso anterior, se distinguen dos (2) zonas con diferentes tipos de solicitaciones. En la Zona A (dentro del bloque caído), las viviendas sufrirán daños asociados con desplazamientos verticales instantáneos. En la Zona B (debajo del bloque), los daños en las viviendas son proporcionales a la energía cinética del bloque; dada la escala de trabajo, la energía se asocia, a su vez, con el volumen del bloque.

3.3.4.2. Criterios de intensidad

Teniendo en cuenta el nivel de detalle del estudio de amenaza, se establecieron las intensidades de los diferentes tipos de solicitaciones mencionadas anteriormente, las cuales se presentan a continuación.

Tabla 9. Criterios de intensidad de las solicitaciones utilizados en el estudio.

Evento	Solicitación		Criterio de intensidad
Deslizamientos o flujos	Rapidez del movimiento	Lento	Vm < m/año
		Rápido	Vm > m/año
	Presiones laterales	Baja	SC < 1/3 SE
		Media	1/3 SE < SC < 2/3 SE
		Alta	SC > 2/3 SE
Caida de bloques	Desplazamientos verticales	Bajo	DV < cm
		Alto	DV > cm
	Impactos	Bajo	Vb < 1 dm^3
		Medio	1 dm^3 < Vb < 0.5 m^3
		Alto	Vb > 0.5 m^3

Donde,
Vm : Velocidad del movimiento
SC : Superficie de contacto (altura de la acumulación de material).
SE : Superficie expuesta (altura de la edificación).
DV : Desplazamientos verticales instantáneos.
Vb : Volumen del bloque.

3.3.4.3. Cualificación de las solicitaciones

Teniendo en cuenta los niveles de daño expuestos en el numeral 3.3., se asociaron los posibles daños ocasionados por un evento dado, de acuerdo tanto al tipo de solicitud (magnitud del evento) como a la tipología de la vivienda. A continuación se presenta la matriz de daño utilizada.

Tabla 10. Cualificación de las solicitaciones dependiendo del tipo de vivienda.

			Tipo de vivienda			
Evento	Solicitación		B1	B2	B3	B4
Deslizamiento o flujo	Rapidez del movimiento	Lento	Alto	Medio	Medio	Bajo
		Rápido	Alto	Alto	Alto	Medio
	Presiones laterales	Baja	Medio	Medio	Medio	Bajo
		Media	Alto	Alto	Medio	Medio
		Alta	Alto	Alto	Alto	Medio
Caida de bloques	Desplazamientos verticales	Bajo	Medio	Medio	Medio	Bajo
		Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
	Impactos	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo
		Medio	Alto	Alto	Medio	Medio
		Alto	Alto	Alto	Alto	Medio

Para la cuantificación de los niveles de daño físico en las viviendas se utilizó el criterio de valoración de "conjuntos difusos". A dicha cuantificación se le denominó Índice de Vulnerabilidad Física (IVF).

En la teoría de conjuntos difusos, tal como se puede ver en la siguiente figura, la valoración del IVF depende del nivel de confianza. Se asumió que para una confianza de

1.0 (totalmente confiable), los valores del IVF fueran los mismos que el porcentaje de daño asociado con las intensidades de daño del DRM. A medida que la confianza va disminuyendo, el intervalo de valores del IVF va aumentando.

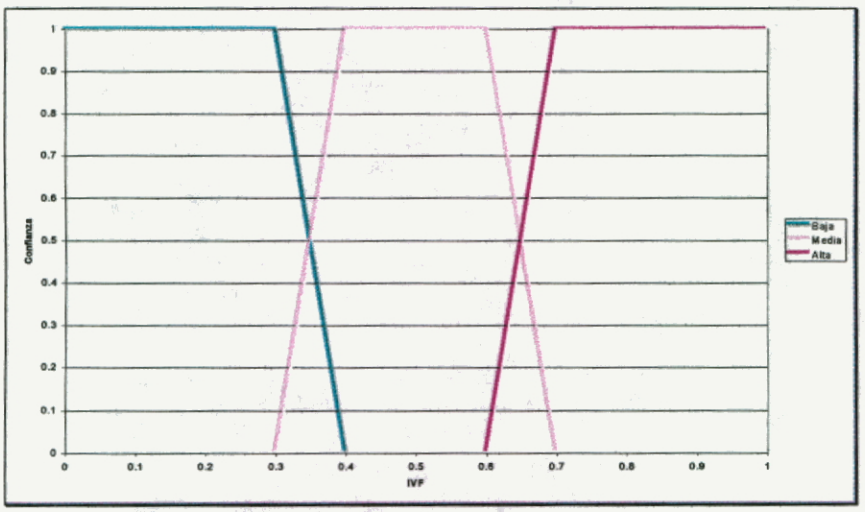


Figura 4. Cuantifiación del IVS utilizando conjunto difusos.

Sin embargo, para aumentar la sensibilidad del modelo y ser un poco conservativo, se prefirió "aumentar" los valores mínimos, de tal forma que no se formen traslapos entre categorías del "Nivel de Daño". A continuación se presenta la relación seleccionada entre la confianza, el nivel de daño y el IVF.

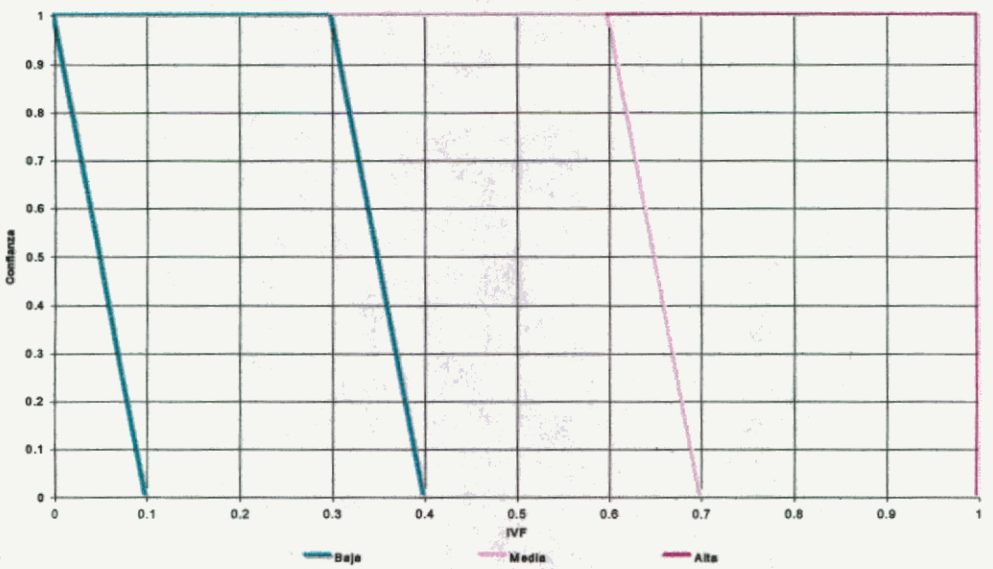


Figura 5. Cuantificación del IVF utilizada en el estudio.

En conclusión, los valores máximos y mínimos del IVF para cada una de sus categorías serán:

Tabla 11. Valores mínimos y máximos del IVF según el nivel de daño.

NIVEL DE DAÑO	IVF MÍNIMO	IVF MÁXIMO
Bajo	0.1 x (1 – CfF)	0.3 + 0.1 x (1 – CfF)
Medio	0.3 + 0.1 x (1 – CfF)	0.6 + 0.1 x (1 – CfF)
Alto	0.6 + 0.1 x (1 – CfF)	1.0

Donde CfF, es el nivel de confianza en la variable IVF. Dado que no se tienen los registros de los cuales Leone obtuvo sus índices, y por las limitaciones del estudio no fue posible realizar un análisis retrospectivo similar, el nivel de confianza de la variable IVF se puede catalogar como "MEDIO", por lo que se adopta un CfF $\cong$ 0.5. De esta forma, los valores máximos y mínimos para las diferentes categorías del IVF, serán:

Tabla 12. Valores del IVF utilizados en el estudio.

NIVEL DE DAÑO	MÍNIMO	MÁXIMO
Bajo	0.05	0.35
Medio	0.35	0.65
Alto	0.65	1.00

3.3.5. Solicitaciones de la amenaza a mediano plazo

Como ya se mencionó, por la escala de trabajo y el estado del arte del conocimiento, no fue posible determinar para la amenaza a mediano plazo las zonas A y B, mencionadas anteriormente. Es por ello que en forma general se clasificaron las zonas de amenaza como "Deslizamientos" o "Caídas de rocas", asignándole a cada una dos (2) tipos de solicitaciones posibles, a saber.

Tabla 13. Solicitaciones en las zonas de amenaza futura.

Tipo de movimiento	Solicitación zona A	Solicitación zona B
Deslizamientos	Velocidad del movimiento (VM)	Presiones laterales (PL)
Caída de rocas	Desplazamientos verticales (DV)	Impactos (IM)

A cada uno de los tipos de solicitaciones, dependiendo del tipo de vivienda, se le asignó una probabilidad cualitativa de vulnerabilidad física, tal como se presenta en las Tablas 14 y 15.

Tabla 14. Probabilidades cualitativas máximas de vulnerabilidad física para las zonas de amenaza futura.

	TIPIFICACION			
Solicitud	B1	B2	B3	B4
VM	Alto	Alto	Alto	Bajo
PL	Alto	Alto	Alto	Medio
DV	Alto	Alto	Alto	Alto
IM	Alto	Alto	Alto	Medio

Tabla 15. Probabilidades cualitativas mínimas de vulnerabilidad física para las zonas de amenaza futura.

	TIPIFICACION			
Solicitud	B1	B2	B3	B4
VM	Alto	Medio	Medio	Bajo
PL	Medio	Medio	Medio	Bajo
DV	Medio	Medio	Medio	Bajo
IM	Medio	Medio	Bajo	Bajo

En cada una de las zonas se determinó la vulnerabilidad física máxima y mínima (teniendo en cuenta las posibles solicitudes), cuantificándola de igual manera que para la amenaza actual.

3.4. Vulnerabilidad a los fenómenos de remoción en masa

Con los dos índices de vulnerabilidad hallados anteriormente (física y social), se calcula un índice de vulnerabilidad general por deslizamientos (IVD). La función entre el IVD y los índices IVS e IVF no está claramente establecida; sin embargo, la relación deberá cumplir lo siguiente:

- Cuando IVS = 0, IVD = IVF.
- Cuando IVF = 0, IVD = 0.
- Cuando IVF = 1, IVD = 1.
- Para cualquier valor de IVF e IVS, $1 \geq IVD \geq 0$.

Como se puede concluir, hay innumerable tipo de funciones que cumplen con los requisitos antes expuestos. Para efectos del presente trabajo, se propone trabajar con la siguiente relación empírica, que cumple con los requisitos y, además, define de la manera esperada el comportamiento de la variable IVD:

$$IVD = \left[1 - (1 - IVF)^{\frac{1}{(1-\alpha\ IVS)}}\right]^{(1-\alpha\ IVS)}$$

Donde,

IVD	:	Índice de vulnerabilidad general por deslizamientos.
IVF	:	Índice de vulnerabilidad física por deslizamientos.
IVS	:	Índice de vulnerabilidad social.
α	:	Importancia del IVS en la evaluación.

Otra variable que entra en juego para la evaluación del IVD, es la que se denominó "importancia del IVS (α)". Esta variable toma valores entre 0 y 1 (de menor a mayor importancia); si α=0, la variable IVD no tiene importancia para la evaluación del IVD, o sea, que IVD = IVF; si α=1, el IVS adquiere una gran importancia para obtener el valor de IVD, tanto así que, para IVS grandes (tienden a 1), el IVD≈1, excepto cuando IVF=0, que toma un valor de cero. En la Figura No. 6 se presentan las curvas que relacionan el IVD con el IVF, el IVD y α.

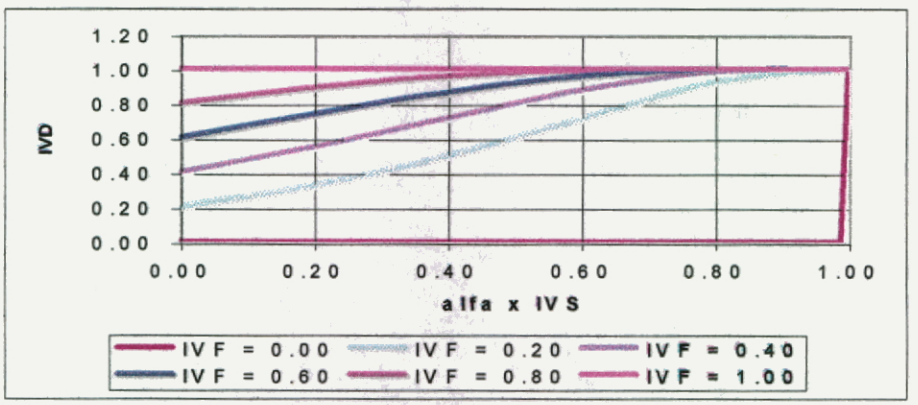


Figura 6. Nomograma para el cálculo del IVD.

Dadas las condiciones socioeconómicas de las zonas objeto del estudio, podemos decir que la importancia de la variable IVS en la evaluación es "ALTA", por lo que se toma un valor de α igual a 0.8. En la siguiente figura se muestran las curvas que relacionan tanto el IVF como el IVS (con la importancia seleccionada), con el IVD.

000016

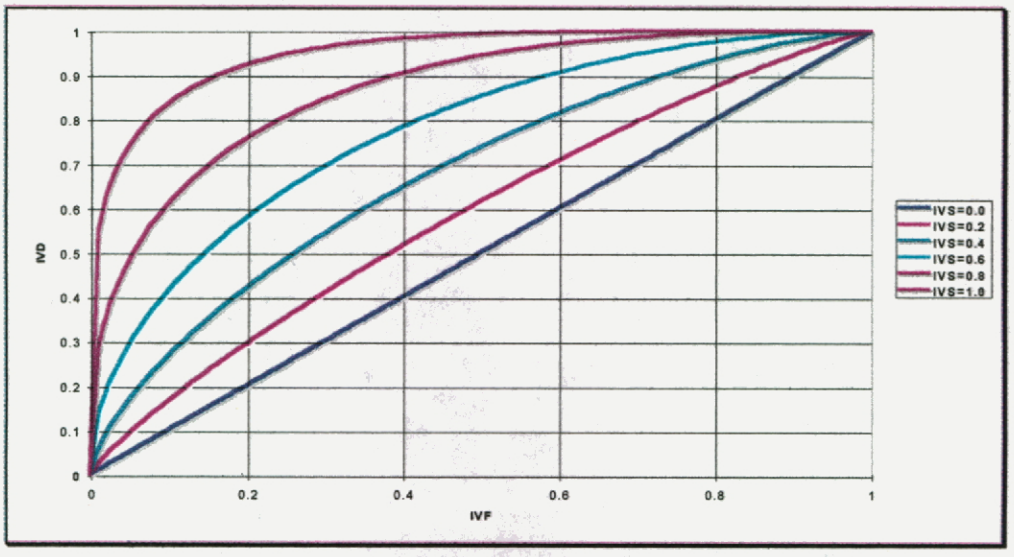


Figura 7. Cálculo del IVD para una importancia del 80%.

4. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE PÉRDIDA Y RIESGO

4.1. Generalidades

Se puede expresar el riesgo global incurrido sobre cada zona con solicitación determinada o con una categoría de amenaza dada, con un índice que se obtiene al combinar las probabilidades de ocurrencia de las solicitaciones consideradas por índices de pérdidas potenciales.

Los índices de pérdidas (IP) que se hallan para el presente trabajo, son las pérdidas directas (pérdidas de capital o personas afectadas), las cuales se pueden calcular multiplicando los valores en juego por los IVD respectivos.

El índice de pérdida (IP) correspondiente se obtiene dividiendo la suma de estos productos por el valor global de los valores en juego presentes en cada una de las zonas de alta amenaza. Así se obtiene un valor comprendido entre 0 y 1, así:

$$IP = \frac{\Sigma\, IVDi \times VIi}{\Sigma\, VIi}$$

El índice de riesgo (IR), expresado entre 0 y 1, y aplicado a una zona con solicitud determinada, se obtiene enseguida multiplicando el índice de pérdidas por la probabilidad de ocurrencia de la solicitud considera.

4.2. Valores en Juego e Índices de Pérdidas

4.2.1. Generalidades

En el presente estudio se seleccionaron las siguientes variables que determinan los valores en juego del trabajo, que a su vez determinan los Índices de pérdidas correspondientes.

Tabla 16. Variables e Índices de Pérdidas utilizados.

ELEMENTO EXPUESTO	VARIABLE	ÍNDICE DE PÉRDIDAS
Viviendas	Precio de la manzana	IPV
	Área de la manzana afectada	IPA
Personas	Habitantes por manzana afectada	IPH

Con estos tres (3) índices se pueden determinar las pérdidas que pueden ocurrir en caso de que se presente una solicitación dada.

Además, se halló un tercer índice de pérdidas denominado "Índice de Pérdidas relativo al área afectada" (IPR), el cual se definió como:

$$IPR = \frac{\Sigma\ IVDi \times VIi}{As}$$

Donde:

IPR : Índice de pérdida relativo al área.
IVDi : Índice de vulnerabilidad al deslizamiento de la manzana i.
As : Área de afectación posible de la solicitación dada-

4.2.2. Valores en juego utilizados

- Para el precio de las viviendas se utilizaron los datos disponibles para las reubicaciones realizadas por la Upes. De acuerdo con el análisis estadísticos de los datos se obtuvieron los siguiente resultados:

Tabla 17. Valores por metro cuadrado del terreno según el estrato socioeconómico (en pesos de 1997).

ESTRATO	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO
1	66543	18857
2	107978	53156
3	Sin dato	Sin dato
4	Sin dato	Sin dato
5	Sin dato	Sin dato
6	Sin dato	Sin dato

Tabla 18. Valor por metro cuadrado de terreno de las viviendas según la tipología (en pesos de 1997).

TIPOLOGÍA	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO
B1	36009	21031
B2	98038	60068
B3	158365	136635
B4	Sin dato	Sin dato
LV	0	0

El precio total de las viviendas se obtuvo al sumar el valor por metro cuadrado del terreno y la construcción y multiplicando por los metros cuadrados afectados de la manzana. Es importante resaltar que, como los estudios estaban destinados a la legalización de barrios (ubicados en estratos 1 o 2, y tipologías de viviendas que clasifican como B1, B2 o B3), no se requirieron los datos que no aparecen en las dos tablas anteriores. Sin embargo, la metodología propuesta se puede utilizar para otros casos, siempre y cuando se hallen puntualmente los valores en juego de las viviendas.

- Para el número de habitantes, se tomaron los datos a nivel manzana reportados por el DANE en el censo de 1993. En los sitios donde no se contaba con esta información se tomó con respecto a la densidad poblacional del sector correspondiente.

- El área afectada se determinó al hacer el cruce en el SIG de los "layers" de procesos y el manzaneo.

4.2.3. Categorización de la vulnerabilidad

Se determinó un quinto parámetro denominado "Índice de Pérdidas Globales" (IPG). Este índice se definió como el promedio aritmético de los cuatro índices de pérdidas mencionados anteriormente, o sea:

$$IPG = \frac{IPA + IPV + IPH + IPR}{4}$$

Debido a las incertidumbres del modelo, para cada variable se tendrán los valores máximos y mínimos característicos. El porcentaje de incertidumbre del modelo de vulnerabilidad se definió como:

$$\%\ Incertidumbre = \frac{(IPGmax - IPGmin)}{(IPGmax + IPGmin)}$$

Teniendo en cuenta la valoración de conjuntos difusos presentados en la Figura 1, con el valor del IPG promedio, se determinó la categorización de la vulnerabilidad, de tal forma que la cartegorización debe tener una confianza mayor al 50%. De acuerdo con lo anterior, la categorización de la vulnerabilidad se establece según lo presentado en la

Tabla 19.

Tabla 19. Categorización de la vulnerabilidad.

CONDICIÓN	CATEGORÍA DE LA VULNERABILIDAD
IPGprom < 0.125	Muy Bajo
0.125 < IPGprom < 0.375	Bajo
0.375 < IPGprom < 0.625	Medio
0.625 < IPGprom < 0.875	Alto
IPGprom > 0.875	Muy Alto

4.3. Índices de Riesgo (IR)

4.3.1. Generalidades

Para cada uno de los cuatro (4) índices de pérdidas enunciados en el numeral 4.2.1, se halló su respectivo índice de riesgo, al multiplicar el primero por la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. De esta forma se hallan cuatro índices de riesgo a saber:

Tabla 20. Índices de riesgo determinados para el estudio.

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
Índice de riesgo de personas afectadas	IRH
Índice de riesgo de área de vivienda afectada	IRA
Índice de riesgo de costos de vivienda afectada	IRV
Índice de riesgo de área de vivienda afectada relativa al área de la solicitación.	IRR

Con los tres (3) primeros índices se pueden determinar los valores esperados de las pérdidas dada la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno determinado, al multiplicarlo por las valores en juego de cada zona. Con el último índice (IRR), se puede determinar el valor esperado del área habitada que se verá afectada dada la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno determinado, al multiplicarlo por el área de afectación de la solicitud.

Los cuatro índices de riesgo determinados se grafican en cuatro ejes, y así se puede hallar lo que se denominó la "Roseta de Riesgo". En la Figura 8 se presenta una ejemplo de una de dichas rosetas.

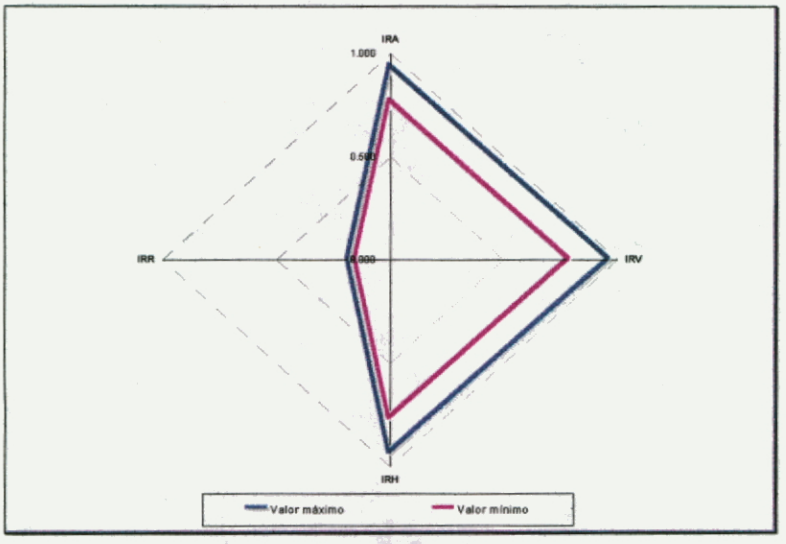


Figura 8. Roseta de riesgo.

4.3.2. Categorización del riesgo

De igual forma que para la vulnerabilidad, se determinó un quinto parámetro denominado "Índice de Riesgo Global" (IRG). Este índice se definió como el promedio aritmético de los cuatro índices de riesgo presentados en la Tabla 16, o sea:

$$IRG = \frac{IRA + IRV + IRH + IRR}{4}$$

Debido a las incertidumbres del modelo, para cada variable se tendrán los valores máximos y mínimos característicos. El porcentaje de incertidumbre del modelo de riesgo se definió como:

$$\%\ Incertidumbre = \frac{(IRGmax - IRGmin)}{(IRGmax + IRGmin)}$$

Para la categorización del riesgo, se utilizó los mismos discriminantes que para la vulnerabilidad, o sea:

Tabla 21. Categorización del riesgo.

CONDICIÓN	CATEGORÍA DEL RIESGO
IRGprom < 0.125	Muy Bajo
0.125 ≤ IRGprom < 0.375	Bajo
0.375 ≤ IRGprom < 0.625	Medio
0.625 ≤ IRGprom < 0.875	Alto
IRGprom ≥ 0.875	Muy Alto

000021

Estas categorías de riesgo se determinaron tanto para la amenaza actual como la futura. El mapa final de riesgo resulta de la combinación de los dos anteriores, teniendo como criterio de decisión, el IRGprom mayor.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

En el Anexo No. 1 se presentan los planos de riesgo por fenómenos de remoción en masa en las localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe, San Cristóbal, Santafé, Chapinero, Usaquén y Suba.

En el Tomo II se presentan los análisis de los resultados.