BANCO MUNDIAL

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN
DIRECCIÓN DE POLÍTICA AMBIENTAL

PROYECTO REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ESTADO ANTE DESASTRES NATURALES
CONVENIO DE DONACIÓN TF-052529

ESTUDIOS Y DISEÑOS DE INTERVENCIÓN FÍSICA PARA RECUPERAR Y EVITAR LA OCUPACIÓN DE LA ZONA DE ALTA AMENAZA EN EL DESARROLLO NUEVA ESPERANZA, DE LA LOCALIDAD DE RAFAEL URIBE, EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

TOMO III
AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

1. INTRODUCCIÓN

Haciendo parte del programa "*Reducción de la vulnerabilidad del estado ante desastres naturales*", y en el marco de la donación japonesa No. TF052529 y del acuerdo interadministrativo subsidiario de donación 065, celebrado entre la Agencia Colombiana de Cooperación Internacional (ACCI) y el Departamento Nacional de Planeación (DNP), se contrató (Contrato No. 078 de 2003) a la firma Geocing Limitada para llevar a cabo los "Estudios y diseños de intervención física para recuperar y evitar la ocupación de la zona de alta amenaza en el desarrollo Nueva Esperanza, de la localidad de Rafael Uribe, en la ciudad de Bogotá D.C.", proyecto propuesto por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencia de Bogotá (DPAE). A continuación se presenta los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo del sector, involucrando para tal efecto las variables de los tres componentes principales del diagnóstico presentado en el Tomo II: geoesférico, urbano y social.

Los aspectos geoesféricos se tienen en cuenta especialmente en la evaluación de la amenaza, mientras que los otros dos (urbano y social) son la base para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de las zonas en que se sectorizó el área de estudio (ver Tomo II). Para el desarrollo del contenido del presente tomo, el texto que se desarrollará a continuación contiene los siguientes ítems:

- Marco teórico.
- Amenaza por fenómenos de remoción en masa.
- Vulnerabilidad física por fenómenos de remoción en masa.
- Riesgo físico por fenómenos de remoción en masa.

- Riesgo holístico por sectores.

2. MARCO TEÓRICO

Para la prevención o mitigación de desastres es fundamental ahondar esfuerzos para determinar las posibles consecuencias (riesgo) sobre un elemento expuesto (que intrínsecamente presenta una vulnerabilidad) ante un evento amenazante; en el lenguaje corriente, los términos amenaza, vulnerabilidad y riesgo se tienden a utilizar indiscriminadamente y aún a confundirlos, por lo que se estima necesario hacer algunas precisiones sobre ellos. Según Cardona (1989), conceptualmente, el riesgo se puede resumir así: "Una vez conocida la amenaza o peligro (H), entendida como la probabilidad de que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a cierto nivel durante un período de exposición determinado, y conocida la vulnerabilidad (V), entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto a ser afectado o de ser susceptible de sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un evento con cierta intensidad, el riesgo (R) puede entenderse como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento expuesto, como consecuencia de un evento con una intensidad mayor o igual a cierto nivel, es decir, la probabilidad de exceder unas consecuencias sociales, ambientales y/o económicas durante un período de tiempo determinado".

3. AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

3.1. Introducción

Los movimientos en masa (deslizamientos, caída de bloques y flujos), junto con la erosión, hacen parte de los procesos naturales de denudación de la corteza terrestre y como tales no se consideran susceptibles de total manejo, pero el riesgo que pueden generar si puede ser eventualmente evitable.

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que se deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido. En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera (por su pérdida de resistencia, contenido de agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lujar a un “flujo” (González, 2002).

Según González (1990), los deslizamientos pueden considerarse como fenómenos de segundo orden ya que son producto de factores naturales o artificiales los cuales constituyen los eventos de primer orden o causas; las diversas magnitudes de estas causas provocan el fenómeno con niveles variables de amenaza, dependientes de la susceptibilidad al fenómeno de los materiales in-situ y de la energía potencial gravitatoria de las masas susceptibles en relación al lugar de interés. La susceptibilidad está controlada por factores intrínsecos (materiales, topografía, estado de esfuerzos, condiciones de drenaje, cobertura vegetal, etc.) mientras que las causas o eventos

detonantes pueden considerarse externos (lluvias, sismos, excavaciones, socavación, obras, etc.); por otra parte, la energía potencial está controlada tanto por propiedades internas (el índice de fragilidad, la deformabilidad, la resistencia residual y el volumen de la masa), como propiedades externas (la altura de posición y la posible trayectoria desde el deslizamiento hasta el punto amenazado). La influencia y efectos en la estabilidad de ladera de los factores intrínsecos (o condicionantes) y detonantes (o desencadenantes) se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y las laderas (González, 2002).

Factores		Influencias y efectos
Intrínsecos	Relieve (pendiente, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición y textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional.	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisotrópico. Zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales.	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones de poros.
	Deforestación	Modificación del balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Detonantes	Precipitación y aportes de agua	Variación de las presiones de poros y del peso del terreno. Saturación de suelos (o cambios en la succión en suelos parcialmente saturados). Erosión
	Cambio en las condiciones hidrogeológicas.	
	Aplicación de cargas dinámicas (sismos) o estáticas (sobrecargas).	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado de esfuerzos de la ladera. Incremento de presiones de poros.
	Cambios morfológicos y de geometría de las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado de esfuerzos.
	Erosión o socavación de la pata del talud.	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado de esfuerzos de la ladera.
	Acciones climáticas (heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Para tener en cuenta gran parte de los factores mencionados anteriormente, los análisis de amenaza por fenómenos de remoción en masa se llevaron a cabo realizando las siguientes labores:

- Zonificación por áreas de comportamiento geotécnico similar teniendo en cuenta los trabajos de geología, geomorfología e investigación del subsuelo (zonas homogéneas).
- Delimitación de las zonas con solicitaciones determinadas (Zonas de Influencia Directa y Zonas de Influencia Indirecta).
- Cálculo de las probabilidades de falla anuales para deslizamientos por medio del método PEM, teniendo en cuenta los análisis de estabilidad determinísticos.
- Determinación de las probabilidades de falla cualitativas por caída de rocas, y determinación de la energía en la caída y la distancia de viaje utilizando para tal efecto el programa RocFall.
- Definición de las probabilidades de falla de los diferentes taludes para diferentes períodos de retorno.

3.2. Objetivo

El objetivo principal de este capítulo es determinar la amenaza por fenómenos de remoción en masa en el área de estudio, definida como la probabilidad de ocurrencia de los diferentes fenómenos que pueden ocurrir (deslizamientos o caída de rocas), así como sus posibles áreas de influencia y solicitaciones características.

3.3. Metodología

3.3.1. Variables aleatorias

En forma general, el Factor de Seguridad (FS) de un talud está dado por la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes. A su vez, las fuerzas resistentes son función de los parámetros de resistencia del material (ángulo de fricción ϕ y cohesión c), la aceleración producida por el sismo (α), el peso unitario (γ) y la geometría del talud; las fuerzas actuantes, a su vez, son función del peso unitario (γ), la sobrecarga (q), la geometría del talud, la presión de poros (Ru) y la aceleración producida por el sismo (α). La convolusión de estas variables (según el modelo de falla) determina la distribución de probabilidad del Factor de Seguridad (FS); se puede determinar la probabilidad de falla del talud (P(Dz)) determinando la probabilidad de que el FS sea menor o igual a 1.0.

Para simplificar del modelo, algunas de las variables se tomaron como constantes (el peso unitario y la geometría del talud). Además, como no se tiene una relación entre la presión de poros (expresada como r_u) y la precipitación, se calcularon los FS para las condiciones extremas de saturación (de acuerdo con los análisis retrospectivos), suponiendo que el caso más favorable se presenta cuando la precipitación es menor a la Lluvia Crítica (probabilidad de ocurrencia anual

del orden del 96.7%) y el caso más crítico cuando la precipitación es mayor o igual a la lluvia crítica (probabilidad de excedencia anual del 3.3%, aproximadamente).

Para los análisis se utilizó un coeficiente de correlación entre la cohesión y el ángulo de fricción interna de –0.5[1], mientras que para los otros cinco coeficientes de correlación se utilizó un valor de cero.

3.3.2. Análisis probabilístico de estabilidad

3.3.2.1. Para deslizamientos

Se determina la estabilidad de cada talud característico, hallando el factor de seguridad por medio de la teoría del equilibrio límite y determinando la probabilidad de falla por el método del punto medio –PEM- (Rosenblueth, 1975).

Rosenbleuth (1975) propuso el método PEM (Point Estimate Method) para determinar la probabilidad de falla en obras civiles. En la forma generalizada, el método establece lo siguiente:

Dada una función y (en este caso el factor de seguridad del talud), con variables aleatorias x_1, x_2, ... x_n, es decir:

$$y = f(x_1, x_2, ...x_n)$$

Se definen los valores máximos y mínimos de cada una de las variables aleatorias como:

$$x_n^+ = \bar{x}_n + \sigma(x_n)\text{, para el caso máximo}$$

$$x_n^- = \bar{x}_n - \sigma(x_n)\text{, para el caso mínimo}$$

Entonces, se define la probabilidad de cada combinación de casos (máximos y mínimos), así

$$p^{\pm\pm.....\pm} = \frac{1}{2^n}\left(\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} a_{ij}\cdot\rho_{ij}\right)$$

Donde,

a_{ij} = 1 si las dos variables (i,j) son máximas o mínimas, o –1 en caso contrario.

ρ_{ij} = Coeficiente de correlación entre las variables x_i y x_j

En general, para n variables se tienen 2^n probabilidades condicionales y $n(n-1)/2$ coeficientes de correlación.

[1] Valor adoptado según criterio del consultor.

Se define el valor esperado de la variable *y* como:

$$E(y) = \sum_{k=1}^{2^n} p_k^{\pm\pm.....\pm} \cdot f_k(x_1^{\pm}, x_2^{\pm}, ...x_n^{\pm})$$

y la desviación de la variable *y* como:

$$\sigma(y) = \sqrt{E(y^2) - (E(y))^2}$$

definiendo,

$$E(y^2) = \sum_{k=1}^{2^n} p_k^{\pm\pm.....\pm} \cdot \left[f_k(x_1^{\pm}, x_2^{\pm}, ...x_n^{\pm})\right]^2$$

Una vez definido el valor esperado y la desviación de la variable aleatoria (factor de seguridad) se puede definir la probabilidad de excedencia de un valor determinado (en este caso FS>1) ajustándola a una función de probabilidad determinada (normal, lognormal, etc.)

Las probabilidades de falla se determinaron a corto plazo (probabilidad total para un período de análisis de 1 año) y a mediano plazo.

a) Probabilidades de falla a corto plazo

En forma general el factor de seguridad de un talud es función de cuatro variables; dos de ellas intrínsecas (los parámetros de resistencia) y dos extrínsecas (o factores externos, lluvia y sismo). Sin embargo, simplificando el problema se puede determinar probabilidades condicionales para los casos de factores externos, determinando cuatro casos, a saber:

- Sin lluvia sin sismo.
- Con lluvia sin sismo.
- Sin lluvia con sismo.
- Con lluvia con sismo.

De esta forma, la probabilidad de falla se puede determinar utilizando la regla de probabilidad total (González, 1992):

$$P(FS \le 1) = \sum_{i=0}^{1} \sum_{j=0}^{1} P\left[FS \le 1 / (S_i \cap L_j)\right] \cdot P(S_i \cap L_j)$$

Donde,

S_1 : Probabilidad de ocurrencia del sismo.
$S_0 = 1 - S_1$: Complemento de la probabilidad de ocurrencia del sismo.
L_1 : Probabilidad de ocurrencia de la lluvia.

$L_0 = 1 - L_1$: Complemento de la probabilidad de ocurrencia de la lluvia.

Además, como la lluvia y el sismo son eventos independientes, se tiene que:

$$P(S_i \cap L_j) = P(S_i) \cdot P(L_j)$$

Con estas simplificaciones, se tiene que el factor de seguridad condicional es una función de los dos parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción), que se pueden representar como dos variables difusas (representadas por números difusos).

b) Probabilidades de falla a mediano plazo

Para determinar la probabilidad de falla de los taludes a largo plazo se tuvieron en cuenta dos (2) hipótesis las cuales se describen a continuación.

- *Hipótesis 1*

La probabilidad de ocurrencia para un año de exposición (P(Dz)) está dada por la probabilidad total. Para un período de exposición dado, se toma la probabilidad de ocurrencia de por lo menos una vez en ese período de exposición, es decir:

$$P(Dz)_{Td} = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{Td}$$

Donde Tr es el período de retorno del deslizamiento que se puede aproximar a:

$$Tr = \frac{1}{P(Dz)_1}$$

- ***Hipótesis 2***

Se utiliza al igual que en la otra hipótesis la teoría de la probabilidad total, pero en este caso, se mantiene constante la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento y se varía la probabilidad de ocurrencia (y por lo tanto de no ocurrencia) de la lluvia y el sismo[2], es decir:

$$P(FS \le 1) = \sum_{i=0}^{1} \sum_{j=0}^{1} P\left[FS \le 1 / (S_i \cap L_j)\right] \cdot P(S_i^t \cap L_j^t)$$

[2] González, A. (1992). *AVALANCHE RISK EVALUATION AT UTICA – COLOMBIA.* Primer Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica. Instituto Agustín Codazzi.

3.3.2.2. Para caída de rocas

Debido a que en los taludes susceptibles a caída de rocas no se pudieron determinar familias de discontinuidades predominantes (presenta un intenso fracturamiento) que permita hacer un análisis de estabilidad por formación de cuñas, la probabilidad de ocurrencia de la caída se determinó utilizando calificaciones cualitativas, utilizando el método de conjuntos difusos[3]. Para determinar la distancia de viaje (y la energía cinética de la caída) se utilizó el programa RocFall.

3.4. Zonas homogéneas

3.4.1. Delimitación

Como parte fundamental de la zonificación de amenaza, a continuación se presenta los resultados de la sectorización por zonas homogéneas desde el punto de vista de comportamiento ingenieríl, especialmente en lo referente a estabilidad, teniendo en cuenta los trabajos precedentes (ver Tomo II) de geología, geomorfología e investigación del subsuelo, primordialmente.

En forma general, el área de estudio se dividió en seis grandes zonas, subdivididas a su vez en subzonas (para un total de 12 subzonas), tal como se presenta en el Plano GE108-PL-III-01 y en la Tabla 3-2.

[3] Sánchez-Silva, M. Taylor, C.A. & Blockley, D.I. *HAZARD MANAGEMENT OF PROJECTS IN A EARTHQUAKE.* In: Applications of Statistics an Probability. Lemaire, Favre & Marbarki (eds). Balkema, Rotterdam. 1995.

Tabla 3-2. Descripción de las zonas homogéneas

ZONA	DESCRIPCIÓN GENERAL	SUBZONA	DESCRIPCIÓN DETALLADA
I	Laderas escarpadas (pendientes generalmente mayor a 45°) en arenisca. Por sus altas pendientes, están poco intervenidas por el hombre.	A	En contrapendiente, con drenaje interno, con alto grado de fracturación pero sin presentar evidencia de caída de bloques.
		B	En contrapendiente, con drenaje interno, con alto grado de fracturación y presencia de caída de bloques.
		C	En pendiente estructural, con escorrentía superficial
II	Laderas de alta pendiente (entre 30° y 45°) en alternancias de arcillolitas y areniscas o limolitas.	A	En pendiente estructural, intercalaciones de arcillolita y arenisca, con escorrentía superficial. No presenta evidencia de fenómenos de remoción en masa.
		B	En contrapendiente, intercalaciones de arcillolitas y limolitas, con escorrentía superficial y carcavamiento incipiente. No presenta evidencia de fenómenos de remoción en masa.
III	Laderas coluviales con pendientes altas (mayores a 30°)	A	Coluvión de pata (localizado en la parte baja del talud), sobre arcillolitas y limolitas, presentan una gran intervención antrópica y un gran número de deslizamientos.
		B	Coluvión de pata (localizado en la parte baja del talud), sobre arcillolitas y areniscas, presentan intervención antrópica y algunos deslizamientos.
		C	Coluvión colgado, presentan intervención antrópica y procesos de remoción en masa (deslizamientos)
		D	Coluvión colgado, con poca intervención antrópica; a la fecha de realizar los trabajos de campo (mayo del 2000) no presentaban procesos por fenómenos de remoción en masa.
IV	Laderas denudacionales (suelos residuales), producto de la meteorización de la arcillolita. Presenta intervención antrópica y procesos de inestabilidad.		
V	Ladera de flujos de tierra, muy susceptibles a los procesos erosivos, con evidencia de agrietamientos producto del movimiento del terreno.		
VI	Laderas de origen antrópico, originadas por rellenos de materiales de corte, sin compactación adecuada, ni manejo de aguas.		

3.4.2. Solicitaciones

El tipo de solicitación depende de la localización del elemento expuesto en referencia al sitio donde ocurre el fenómeno[4], tal como se presenta a continuación.

[4] Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia. XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

3.4.2.1. Deslizamientos

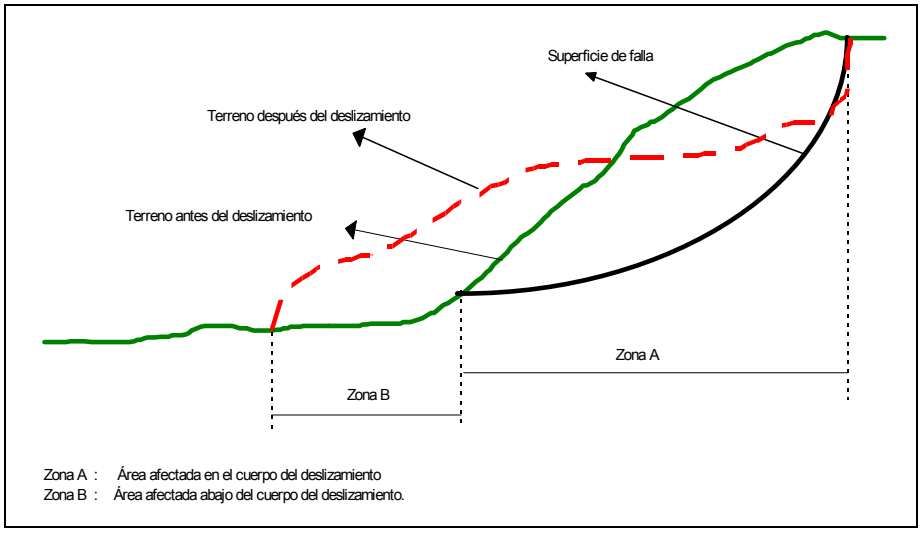


Figura 3-1. Esquema de deslizamiento

Como se puede observar en la figura anterior, se pueden distinguir dos zonas.

En la Zona A (en el cuerpo del deslizamiento) o Zona de Influencia Directa, los daños que van a sufrir las viviendas se pueden relacionar con los desplazamientos laterales (DL) que, a su vez, dependen de la velocidad del movimiento (entre más rápido, los daños pueden ser mayores). Para la caracterización de las velocidades de los movimientos se utilizó la escala propuesta por Cruden y Varnes[5], presentada a continuación.

Tabla 3-3. Rangos de velocidad utilizadas en el estudio

Descripción	Clase	Velocidad característica
Muy rápido	VM1	Mayor a 50 mm/seg
Rápido	VM2	Entre 0,5 mm/seg y 50 mm/seg
Moderado	VM3	Entre 0,05 mm/seg y 0,5 mm/seg
Lento	VM4	Entre 0,005 mm/seg y 0,05 mm/seg
Muy lento	VM5	Menor a 0,005 mm/seg

En la Zona B (abajo del cuerpo del deslizamiento) o Zona de Influencia Indirecta, los daños de las viviendas se pueden relacionar con los empujes laterales (EL) que, igualmente, se pueden asociar con la altura que alcanza la acumulación de material contra la vivienda, así:

[5] Cruden , D. y Varnes D.(1991). ***Landslides types and processes.*** Universidad de Alberta.

Tabla 3-4. Categorías de las presiones laterales utilizadas en el estudio

Descripción	Clase	Característica
Presión lateral alta	PL1	Mayor a 2/3 de la altura de la vivienda
Presión lateral media	PL2	Entre 1/3 y 2/3 la altura de la vivienda.
Presión lateral baja	PL3	Menor a 1/3 de la altura de la vivienda

3.4.2.2. Caída de rocas

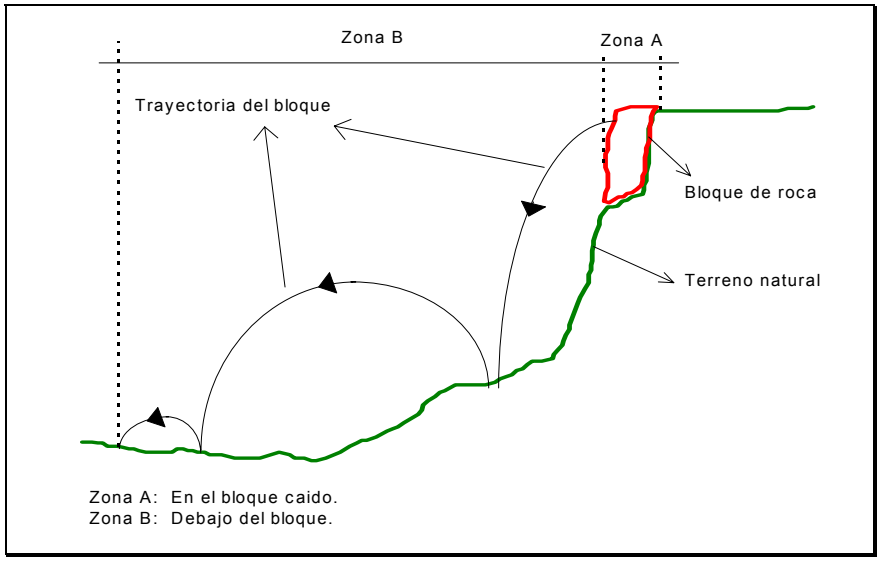


Figura 3-2. Esquema de caída de rocas.

De igual forma que en el caso anterior, se distinguen dos (2) zonas con diferentes tipos de solicitaciones (véase Figura 3-2). En la Zona A (dentro del bloque caído) o Zona de Influencia Directa, las viviendas sufrirán daños asociados con desplazamientos horizontales instantáneos. En la Zona B (debajo del bloque) o Zona de Influencia Indirecta, los daños en las viviendas se pueden asociar al impacto producido por el bloque, que se puede calificar por medio de la energía cinética del bloque.

En el área de estudio, ya que las caídas se presentan en zonas muy escarpadas, con una Zonas A muy pequeñas, que no alcanzan a afectar ninguna casa, las solicitaciones para este tipo de movimiento serán en la Zona B, a la cual se le asocian las siguientes categorías de solicitación, dependiendo de la energía cinética.

Tabla 3-5. Solicitaciones características de la zona de influencia indirecta por caída de rocas[6].

Categoría	Solicitación	Rangos de la energía cinética (Ec)
Muy baja	EC5	Ec < 1 Kj
Baja	EC4	1 kJ < Ec < 10 Kj
Media	EC3	10 kJ < Ec < 100 Kj
Alta	EC2	100 kJ < Ec < 1000 Kj
Muy Alta	EC1	Ec > 1000 kJ

Teniendo en cuenta las zonas homogéneas establecidas, a continuación se presenta las solicitaciones característica de cada una de ellas (ver Tabla 3-6 a Tabla 3-9).

[6] Adaptada de Leone (1996).

Tabla 3-6. Solicitaciones características de la Zona Homogénea I.

ZONA	SUBZONA	SOLICITACIÓN	DESCRIPCIÓN
I	A	IM1	Laderas rocosas (arenisca) en contrapendiente, fracturada, pero que no presentan evidencias de caída de rocas. El posible fenómeno que ocurriría sería la caida de bloques ocasionados por erosión diferencial, perdida de cobertura vegetal y desconfinamiento. Debe implicar el área de influencia por el recorrido que tendrían los bloques al momento de fallar. El grado de amenaza se puede catalogar como alta y la energía cinética del bloque se puede catalogar como muy alta.
	B	IM2	Laderas rocosas (areniscas) muy fracturadas en contrapendiente; corresponde a las zonas donde se presenta caída de rocas por fracturamiento, erosión y gravedad; esta zona se amplia para tener en cuenta el área de influencia del recorrido del bloque. El grado de amenaza se puede catalogar como muy alta, y la energía cinética del bloque se puede catalogar como muy alta.
		IM3	Laderas rocosas (areniscas) poco fracturadas; corresponde a los escarpes donde es poco probable la caída de bloques. El grado de amenaza se puede catalogar como bajo, y la energía cinética del bloque se puede catalogar como baja.
	C	DL1	Son laderas rocosas escarpadas en arenisca, con dominio estructural; no son muy susceptibles a la erosión. Debido a su alta pendiente, no son adecuadas para la construcción de viviendas. En caso de ocurrencia del fenómeno, su velocidad se puede catalogar como muy lenta (menor a 0,05 mm/s). Su grado de amenaza se puede catalogar como baja.

Tabla 3-7. Solicitaciones características de la Zona Homogénea II

ZONA	SUBZONA	SOLICITACIÓN	DESCRIPCIÓN
II	A	DL2	Laderas rocosas (intercalaciones de arcillolita y arenisca), de alta pendiente con dominio estructural; no son muy susceptibles a la erosión. Tienen poca intervención del hombre. El tipo de movimiento característico sería un deslizamiento traslacional controlado por la estratificación; en caso de ocurrencia, la velocidad del movimiento se puede considerar como lenta. Su grado de amenaza es media.
	B	DL3	Ladera rocosa en contrapendiente (intercalaciones de arcillolitas y limolitas), con carcavamiento incipiente. El posible movimiento es un deslizamiento traslacional o compuesto, controlado básicamente por el contacto entre la roca meteorizada con la roca sana; en caso de ocurrencia, la velocidad del movimiento se puede catalogar como lenta. Esta asociada con un grado de amenaza media.

Tabla 3-8. Solicitaciones características de la Zona Homogénea III

ZONA	SUBZONA	SOLICITACIÓN	DESCRIPCIÓN
III	A	DL4	Ladera coluvial con gran intervención antrópica. Los movimientos que se están presentando corresponden a deslizamientos traslacionales o compuestos, con velocidades que se pueden considerar como moderadas. El grado de amenaza es alto.
		EL4	Debido a los cortes para la construcción de las casas pueden ocurrir deslizamientos dentro del cuerpo del coluvión que implica desplazamientos de masas que ocasionan empujes laterales que se pueden catalogar como intermedios.
	B	DL5	Ladera coluvial con intervención antrópica moderada. El mecanismo de falla puede ser un deslizamiento compuesto, controlado por contacto suelo - roca, con velocidades que se pueden catalogar como moderadas. Su amenaza es media. Debido a su posición no se asoció una zona de influencia mayor.
		EL5	Debido a los cortes para la construcción de las casas pueden ocurrir deslizamientos dentro del cuerpo del coluvión que implica desplazamientos de masas que ocasionan empujes laterales que se pueden catalogar como intermedios.
	C	DL6	Ladera coluvial (colgados) con intervención antrópica; la mayoría de éstos han colapsado. Este tipo de solicitación se presenta en el cuerpo del deslizamiento; se caracteríza por desplazamiento lateral (deslizamiento traslacional) con una velocidad del movimiento catalogada como rápida. El grado de amenaza es muy alto.
		EL6	Zona de influencia asociada al posible desplazamiento de la masa coluvial identificada como IIIC. La solicitación característica es la presión lateral, que se pueden catalogar como media. El grado de amenaza es alto.
	D	DL7	Ladera coluvial (colgados) sin intervención antrópica. Este tipo de solicitación se presenta en el cuerpo del deslizamiento; se caracteríza por desplazamiento lateral (deslizamiento traslacional) con una velocidad del movimiento catalogada como rápida. El grado de amenaza es media.
		EL7	Zona de influencia asociada al posible desplazamiento de la masa coluvial identificada como IIID. La solicitación característica es la presión lateral, que se pueden catalogar como media. El grado de amenaza es media.

Tabla 3-9. Solicitaciones características de la Zonas Homogéneas IV, V y VI

ZONA	SOLICITACIÓN	DESCRIPCIÓN
IV	DL8a	Laderas en suelo residual sin procesos de remoción en masa; en caso de presentarse, el tipo de movimiento sería traslacional, controlado por el contacto suelo - roca. La velocidad del movimiento se puede catalogar como moderada. El grado de amenaza es muy alto.
	EL8a	Debido a los cortes para la construcción de las casas pueden ocurrir deslizamientos puntuales que implican desplazamientos de masas que ocasionan empujes laterales que se pueden catalogar como bajos.
	DL8b	Laderas en suelo residual, donde se presentar deslizamientos traslacionales o compuestos, controlados por el contacto suelo - roca. La velocidad del movimiento se puede catalogar como moderada. El grado de amenaza es medio.
	EL8b	Debido a los cortes para la construcción de las casas están ocurriendo deslizamientos puntuales que implican desplazamientos de masas que ocasionan empujes laterales que se pueden catalogar como bajos.
V	DL9	Ladera con flujos de tierras y/o reptamientos; se caracteriza por presentar alta susceptibilidad a la erosión. La velocidad del movimiento se considerada como rápida. El grado de amenaza es alto.
VI	DL10	Ladera de origen antrópico (rellenos), con pendiente muy alta. No presenta en la actualidad fenómenos de remoción en masa. En caso de deslizamiento la velocidad del movimiento se puede catalogar como rápida. Su amenaza es alta.

Teniendo en cuenta las tres (3) solicitaciones típicas en la zona (desplazamientos laterales, empujes laterales e impactos), se realizaron los mapas correspondientes (Plano GE108-PL-III-03 a Plano GE108-PL-III-05), donde se presentan el área de influencia de cada una de las solicitaciones descritas anteriormente.

3.5. Análisis probabilísticos

3.5.1. Factores intrínsecos

Para determinar la variabilidad de estos parámetros se tuvieron en cuenta tanto los datos obtenidos directamente en laboratorio (ensayos de corte directo) como correlaciones con ensayos de campo (SPT) y de laboratorio (límites de Atterberg).

3.5.1.1. Resultados de los ensayos de corte directo

Los resultados se presentan en el Tomo II.

3.5.1.2. De correlaciones con el ensayo de penetración estándar

Se utilizó la metodología propuesta por el Ingeniero Álvaro González[7], donde, en primera instancia se obtiene el ángulo de fricción interna del material por medio de la correlación con el SPT, propuesta por Kishida; posteriormente se determina el esfuerzo de corte en la falla (utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb) dado esté ángulo (suponiendo un esfuerzo normal de falla igual al esfuerzo efectivo in-situ). Teniendo el total de los resultados (puntos de corte a diferentes esfuerzos normales) se puede determinar la línea de falla, obteniéndose así el ángulo de fricción efectivo y la cohesión efectiva del material.

- A continuación se enuncian los pasos realizados para obtener los parámetros de resistencia de los materiales:

- El primer paso consiste en encontrar el N_{70} o número de golpes por pie corregido a una energía del 70%.

- Una vez obtenido N_{70} se calcula el valor del ángulo de fricción interna (ϕ) por la correlación de Kishida:

$$\phi = \sqrt{20 \times N_{70}} + 15$$

- Siguiendo el criterio de falla de Mohr – Coulomb, se procede a calcular el valor correspondiente al esfuerzo cortante suponiendo una cohesión de cero (suponiendo que el ϕ hallando anteriormente es el ángulo de fricción total).

- Se realiza una gráfica esfuerzo normal efectivo v.s. esfuerzo cortante obteniendo de la correlación lineal los valores de c' y ϕ'.

Los resultados obtenidos para los diferentes tipos de suelos encontrados en la zona de estudio de estudio se presentan a continuación

[7] González, A. (1999). **ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EFECTIVOS DE RESISTENCIA CON EL SPT**. X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia. SCI – SCG. Santafé de Bogotá D.C.

3.5.1.3. Correlaciones con el índice de plasticidad

Este método correlaciona el índice de plasticidad con la resistencia al corte no drenado del material (Cu), utilizando la expresión determinada por Skempton. Suponiendo que el material está sometido a un esfuerzo octaédrico igual al esfuerzo vertical efectivo, se puede determinar los puntos p' y q' del círculo de Mohr. Para determinar el ángulo de fricción y la cohesión del material, igual que en el método de González, se halla la línea de falla con todos los puntos de un mismo material.

Pasos a seguir:

- Calcular el Cu por la correlación de Skempton, obteniendo q'.

$$\frac{Cu}{\sigma' v} = 0.0038 + 0.009\, IP$$

- Se calcula el punto p', igual al esfuerzo vertical efectivo

- Con los puntos q' y p' para varios resultados se pueden determinar el ángulo de fricción y la cohesión efectivos.

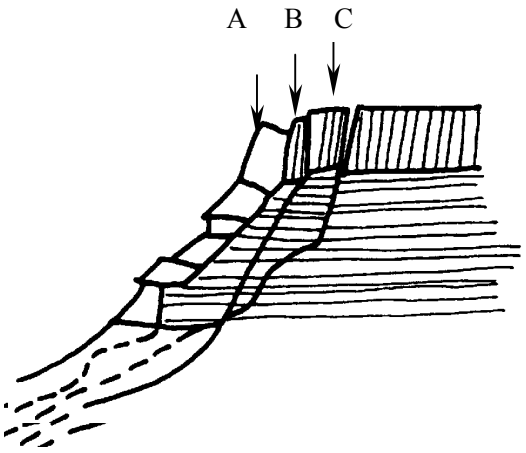
3.6. Resultados obtenidos

En el Anexo I de este Tomo, se presentan los análisis realizados para obtener la probabilidad de falla (deslizamientos) y la energía cinética (caída de bloques) en cada una de las subzonas de estudio. A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

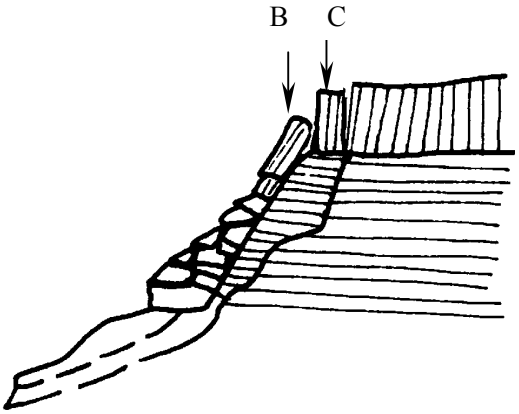
3.6.1. Subzonas IA y IB

Corresponde a los escarpes rocosos (arenisca) en contrapendiente ubicados en la ladera izquierda del valle de la quebrada La Guairita, susceptibles a caida de bloques. El movimiento se presenta con mayor evidencia en la Subzonas IB, y posiblemente el mecanismo de falla se deba a lo expuesto en la Tabla 3-10.

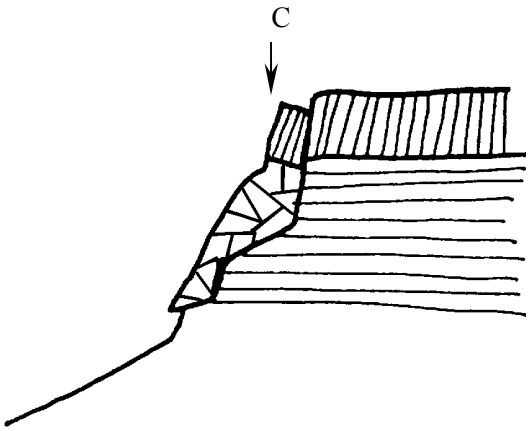
Tabla 3-10. Mecanismos de falla para caída de rocas[8]



La inestabilidad de taludes rocosos fracturados está relacionada con el crecimiento significativo de esfuerzos cortantes diferenciales en el substrato estratificado; dicho incremento es producido por descarga lateral (altura de esfuerzos) impuesto por erosión de los materiales del talud.



El sobre - esfuerzo en planos de falla potencial y las deformaciones cortantes excesivas llevan al mecanismo de falla progresiva. La pérdida de soporte en la base o una disminución en la cohesión del material subyacente puede ser suficiente para inducir la falla de la roca diaclasada de encima.



La deformación excesiva y la pérdida de soporte en la fundación, promueven falla rotacional de las columnas rocosas. También puede ocurrir volcamiento ("toppling") directo, dependiendo de la geometría del talud. Eventualmente puede ocurrir deslizamiento desde mayor altura en el talud.

[8] Bandis S.C. (1999). "Numerical Modeling Techniques as Predictive Tools of Ground Instability". Cap 7 de Casale R. Y Margottini, C Eds, Floods and Landslides", Springer - Verlag, Berlin. Adaptado del trabajo "Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por fenómenos de remoción en masa en el barrio Callejón de Santa Bárbara", IGL Limitada – DPAE. Abril de 2000.

Debido a la complejidad de la modelación en este caso, para la evaluación de la probabilidad de falla se recurrió a la cuantificación de las calificaciones cualitativas de expertos mediante la técnica de los conjuntos difusos[9], dando como resultado lo presentado en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11 Probabilidades de falla para caída de rocas.

Zona	Probabilidad cualitativa	Probabilidad máxima	Probabilidad mínima
IA	Alta	0.627	0.457
IB	Muy Alta	1.000	0.850
IC	Baja	0.150	0.000

Para determinar la distancia de viaje del bloque de roca, así como su energía cinética a lo largo del recorrido, se utilizó el programa de computador RocFall. Para la modelación se tomaron bloques con masas entre 1000 Kg y 2000 Kg (volumenes del orden de 0.5 m^3 a 1 m^3). Los resultados arrojados para los diferentes taludes de análisis se presentan en el Anexo I, que en resumen son:

- Distancia de viaje promedio : 50 m a 70 m.
- Energía cinética máxima : 300 kJ a 500 kJ.

3.6.2. Zonas IC y IIA

Corresponde a las laderas estructurales localizadas en la margen derecha de la quebrada La Guarita. Para el modelo de falla se tomó, conservadoramente, una falla de talud infinito con un ángulo de inclinación de 35°, cuyos análisis se presentan en el Anexo I. Los resultados de los análisis probabilísticos se presentan a continuación.

Tabla 3-12. Probabilidades de falla para la Subzona IC

	FACTOR DE SEGURIDAD		DESVIACIÓN DEL FS		PROBABILIDAD DE FALLA	
CONDICIÓN	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin sismo sin lluvia	1.398	1.370	0.278	1.226	0.076	0.062
Sin sismo con lluvia	1.152	1.116	0.283	1.289	0.295	0.332
Sin lluvia con sismo	1.036	1.015	0.206	1.226	0.430	0.470
Con sismo con lluvia	0.854	0.828	0.210	1.289	0.756	0.772
Probabilidad total (anual)	1.389	1.360	0.047	1.117	0.084	0.071

[9] Sánchez-Silva, M. Taylor, C.A. & Blockley, D.I. *HAZARD MANAGEMENT OF PROJECTS IN A EARTHQUAKE.* In: Applications of Statistics an Probability. Lemaire, Favre & Marbarki (eds). Balkema, Rotterdam. 1995.

Tabla 3-13. Probabilidades de falla Subzona IIA

	FACTOR DE SEGURIDAD		DESVIACIÓN DEL FS		PROBABILIDAD DE FALLA	
CONDICIÓN	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin sismo sin lluvia	1.339	1.308	0.282	1.241	0.115	0.107
Sin sismo con lluvia	1.106	1.068	0.288	1.308	0.356	0.403
Sin lluvia con sismo	0.993	0.970	0.209	1.241	0.514	0.556
Con sismo con lluvia	0.820	0.792	0.213	1.308	0.800	0.808
Probabilidad total (anual)	1.330	1.300	0.045	1.111	0.124	0.117

3.6.3. Subzonas IIB y IV

Corresponde a las laderas denudacionales de arcillolita que según su grado de meteorización se clasificaron como rocosas (IIB, horizonte de meteorización menor a 1 m) y suelos residuales (IV, horizonte de meteorización entre 1 m y 5 m). Los resultados de los análisis probabilísticos para las dos subzonas se presentan a continuación.

Tabla 3-14. Probabilidades de falla Subzona IIB

	Factor de seguridad		Desviación del FS		Probabilidad de falla	
Condición	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin lluvia sin sismo	1.381	1.317	0.408	1.371	0.175	0.191
Sin lluvia con sismo	0.953	0.905	0.295	1.393	0.563	0.619
Con lluvia sin sismo	0.823	0.723	0.381	1.721	0.679	0.725
Con lluvia con sismo	0.542	0.453	0.282	1.920	0.948	0.887
Probabilidad total	1.354	1.279	0.424	1.425	0.202	0.244

Tabla 3-15. Probabilidades de falla Subzona IV

	Factor de seguridad		Desviación del FS		Probabilidad de falla	
Condición	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin lluvia sin sismo	0.835	0.835	0.016	1.019	1.000	1.000
Sin lluvia con sismo	0.567	0.567	0.012	1.022	1.000	1.000
Con lluvia sin sismo	0.320	0.320	0.006	1.018	1.000	1.000
Con lluvia con sismo	0.178	0.178	0.004	1.021	1.000	1.000
Probabilidad total	0.810	0.797	0.111	1.229	0.956	0.864

3.6.4. Zona III

Corresponde a las laderas coluviales presentes en la zona de estudio, con pendientes medias a altas dependiendo de su posición dentro del talud. A continuación se presentan los resultados de los análisis más desfavorables para cada una de las subzonas en que se catalogaron estos coluviones.

Tabla 3-16. Probabilidades de falla Subzona IIIC

	Factor de seguridad		Desviación del FS		Probabilidad de falla	
Condición	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin lluvia sin sismo	0.788	0.788	0.020	1.026	1.000	1.000
Sin lluvia con sismo	0.540	0.540	0.011	1.021	1.000	1.000
Con lluvia sin sismo	0.562	0.561	0.014	1.026	1.000	1.000
Con lluvia con sismo	0.362	0.361	0.009	1.024	1.000	1.000
Probabilidad total	0.777	0.775	0.053	1.082	1.000	0.999

Tabla 3-17. Probabilidades de falla Subzona IIIB

	Factor de seguridad		Desviación del FS		Probabilidad de falla	
Condición	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin lluvia sin sismo	1.216	1.191	0.226	1.240	0.170	0.208
Sin lluvia con sismo	0.840	0.821	0.166	1.259	0.832	0.805
Con lluvia sin sismo	0.878	0.842	0.219	1.362	0.712	0.711
Con lluvia con sismo	0.582	0.552	0.162	1.427	0.995	0.953
Probabilidad total	1.199	1.170	0.237	1.262	0.201	0.250

Tabla 3-18. Probabilidades de falla subzona IIIA

	Factor de seguridad		Desviación del FS		Probabilidad de falla	
Condición	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin lluvia sin sismo	0.919	0.904	0.184	1.188	0.669	0.720
Sin lluvia con sismo	0.627	0.616	0.133	1.199	0.997	0.996
Con lluvia sin sismo	0.731	0.723	0.117	1.153	0.989	0.989
Con lluvia con sismo	0.479	0.473	0.084	1.167	1.000	1.000
Probabilidad total	0.912	0.897	0.186	1.194	0.681	0.730

Tabla 3-19. Probabilidades de falla Subzona IIID

	Factor de seguridad		Desviación del FS		Probabilidad de falla	
Condición	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin lluvia sin sismo	1.148	1.135	0.166	1.164	0.187	0.201
Sin lluvia con sismo	0.793	0.783	0.123	1.176	0.954	0.934
Con lluvia sin sismo	0.972	0.958	0.162	1.190	0.568	0.597
Con lluvia con sismo	0.673	0.663	0.112	1.193	0.998	0.990
Probabilidad total	1.139	1.125	0.171	1.171	0.209	0.228

3.6.5. Zona V

Corresponde a los flujos de tierra, localizados en la ladera izquierda de la cuenca de la quebrada La Guarita. Parte de estas zona está intervenida por el hombre. Para los análisis de estabilidad, se realizó el cálculo del factor de seguridad suponiendo un talud infinito con un ángulo de inclinación de 30°, un espesor del estrato de 7 m y profundidades del nivel de agua variables entre 0 m y 5 m con respecto a la superficie; los resultados se presentan en el Anexo I. En la Tabla 3.19 se presenta el resumen de los resultados probabilísticos de estabilidad.

Tabla 3-20. Probabilidades de falla para la Zona V

	FACTOR DE SEGURIDAD		DESVIACIÓN DEL FS		PROBABILIDAD DE FALLA	
CONDICIÓN	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin sismo sin lluvia	1.060	1.029	0.255	1.281	0.406	0.454
Sin sismo con lluvia	0.738	0.688	0.265	1.461	0.839	0.838
Sin lluvia con sismo	0.757	0.735	0.182	1.281	0.909	0.893
Con sismo con lluvia	0.527	0.491	0.189	1.461	0.994	0.969
Probabilidad total (anual)	1.049	1.017	0.060	1.155	0.422	0.468

3.6.6. Zona VI

Corresponde a los rellenos de origen antrópico, localizados en las márgenes de la quebrada La Guarita. Parte de esta zona está intervenida por el hombre. Los resultados de los análisis probabilísticos se presentan a continuación.

Tabla 3. 20. Probabilidades de falla para la Zona VI

	FACTOR DE SEGURIDAD		DESVIACIÓN DEL FS		PROBABILIDAD DE FALLA	
CONDICIÓN	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal	Normal	Lognormal
Sin sismo sin lluvia	1.020	1.005	0.170	1.185	0.454	0.488
Sin sismo con lluvia	0.561	0.531	0.181	1.399	0.992	0.970
Sin lluvia con sismo	0.756	0.745	0.126	1.185	0.973	0.958
Con sismo con lluvia	0.416	0.393	0.134	1.399	1.000	0.997
Probabilidad total (anual)	1.004	0.989	0.083	1.219	0.473	0.505

3.7. Zonificación por amenaza

3.7.1. Categorización

Para cada una de las zonas con solicitaciones dadas se le asignó una categoría de amenaza, según el criterio presentado a continuación.

Tabla 3-21. Criterios de zonificación por amenaza

Categoría de amenaza	Descripción	Probabilidad de falla	
		Máxima	Mínima
Muy Alta	Alta posibilidad de ocurrencia. Sucede en forma reiterada (tiene una probabilidad de ocurrencia anual)	1.00	0.90
Alta	Significativa posibilidad de ocurrencia. Sucede algunas veces (ocurre en promedio cada 2.5 años)	0.90	0.40
Media	Limitada posibilidad de ocurrencia. Puede suceder en forma esporádica (ocurre cada 10 años)	0.40	0.10
Baja	Baja posibilidad de ocurrencia. Sucede muy raramente (ocurre en promedio cada 20 años)	0.10	0.05
Muy Baja	Muy baja posibilidad de ocurrencia. Sucedería en forma excepcional (ocurre en promedio cada 100 años).	0.00	0.01

Teniendo en cuenta esta zonificación, en la Tabla 3-22 se presenta el resumen de los resultados obtenidos.

Con el cruce de los tres mapas de solicitaciones y teniendo en cuenta que la categoría predominante es la mayor, se realizó el plano de amenaza por fenómenos de remoción en masa en el barrio Nueva Esperanza (véase Plano GE108-PL-III-06).

Tabla 3-22. Resumen de resultados de la amenaza por FRM

TIPO DE SOLICITACIÓN	IDENTIFICADOR	PROBABILIDAD			CLASE DE SOLICITACIÓN
		Mínima	Máxima	Categoría	
Impactos	IM1	0.457	0.627	A	EC2
	IM2	0.850	1.000	MA	EC2
	IM3	0.000	0.150	B	EC5
Desplazamientos laterales	DL1	0.071	0.084	B	VM5
	DL2	0.117	0.124	M	VM4
	DL3	0.202	0.244	M	VM4
	DL4	0.681	0.730	A	VM3
	DL5	0.201	0.250	M	VM3
	DL6	0.999	1.000	MA	VM2
	DL7	0.209	0.228	M	VM2
	DL8a	0.864	0.956	MA	VM3
	DL8b	0.207	0.231	M	VM3
	DL9	0.422	0.468	A	VM2
	DL10	0.473	0.505	A	VM2
Presiones laterales	EL4	0.681	0.730	A	PL2
	EL5	0.201	0.250	M	PL2
	EL6	0.999	1.000	MA	PL2
	EL7	0.209	0.228	M	PL2
	EL8a	0.864	0.956	MA	PL3
	EL8b	0.207	0.231	M	PL3

3.7.2. Descripción de las zonas de amenaza

3.7.2.1. Zona de amenaza muy alta

Están catalogadas dentro de esta zona las laderas con una probabilidad de falla promedio anual mayor al 90%. Dentro de este grupo están las zonas de influencia directa e indirecta de:

- Las laderas coluviales colgadas (con gran intervención antrópica) que actualmente tienen procesos de remoción en masa (deslizamientos traslacionales).
- Laderas en suelo residual (con gran intervención antrópica) que presentan en la actualidad deslizamientos de tipo traslacional.
- Zona de influencia por caída de bloques de roca (arenisca) por desconfinamiento, pérdida de cobertura vegetal y erosión diferencial.

Se recomienda en estas zonas no permitir más construcciones.

3.7.2.2. Zona de amenaza alta

Dentro de esta categoría están catalogadas las laderas con probabilidades de falla anuales promedio entre el 40% y el 90%, que son:

- Laderas coluviales de pata, con gran intervención antrópica.
- Laderas de flujos de tierra y/o reptamientos.

- Laderas de origen antrópico (rellenos).

Estas zonas son muy susceptibles a presentar fenómenos de remoción en masa, por lo que se recomienda no permitir la construcción de más viviendas en ellas. Además, en la zonas de rellenos antrópicos, se está interviniendo la ronda de la quebrada La Guarita.

3.7.2.3. Zona de amenaza media

Corresponde a los sitios con probabilidades de falla entre el 10% y el 40%, siendo estos los siguientes:

- Laderas rocosas (intercalaciones de arcillolita y arenisca) de alta pendiente con dominio estructural.
- Ladera rocosa (arcillolita) en contrapendiente con carcavamiento incipiente.
- Laderas rocosas (arenisca) en contrapendiente con posibilidad de caída de rocas si se remueve la capa vegetal y se produce erosión diferencial.
- Ladera coluvial de pata sin gran intervención antrópica.
- Ladera coluvial (colgado) sin intervención antrópica.
- Ladera en suelo residual con intervención antrópica moderada.

Para evitar el aumento de la amenaza en estas zonas se recomienda evitar más asentamientos humanos en ellas (especialmente en las laderas coluviales y de suelos residuales). Además, se deberán tomar acciones preventivas para evitar la erosión y la saturación de los materiales (manejo de aguas lluvias y negras). En estas zonas se pueden presentar problemas puntuales por las excavaciones realizadas para la adecuación de las viviendas.

3.7.2.4. Zonas de amenaza baja

Corresponden a las laderas rocosas en arenisca, de dominio estructural que no presentan gran fracturamiento, y por ende no hay posibilidad de caída de bloques. Por su alta pendiente no son adecuadas para la construcción de viviendas. La probabilidad de falla promedio anual es menor al 10%. Sin embargo, por la misma construcción de las viviendas, se construyen terrazas sin ningún control técnico, que puede llevar a colapsar las estructuras (véase Figura 3-3). Por esta razón, para la evaluación de la amenaza en estas viviendas se cataloga como alta asignándole una probabilidad de falla del 50%.

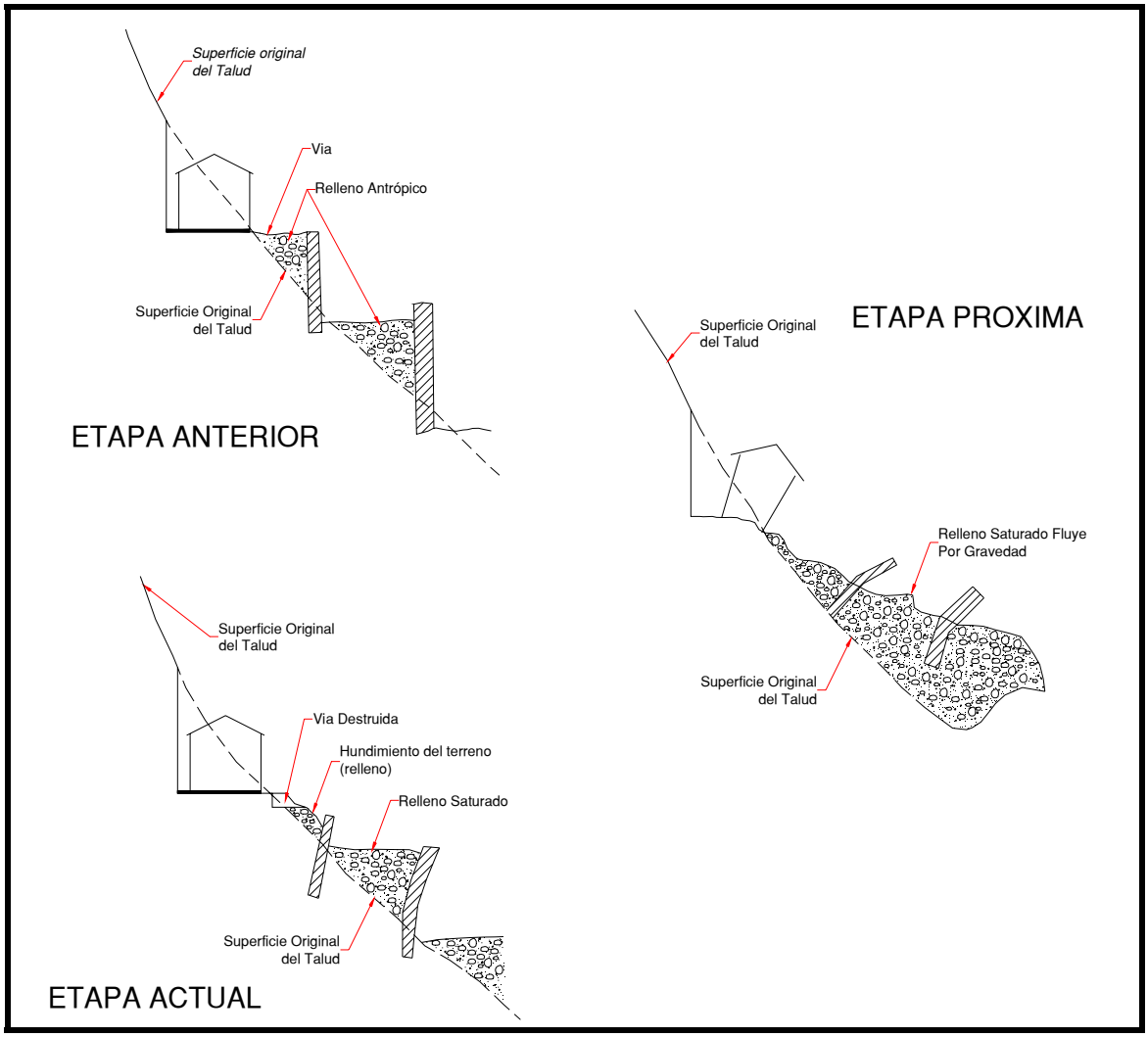


Figura 3-3. Esquema típico de los problemas presentados en las zonas de alta pendiente

3.7.3. Resumen de resultados

De acuerdo con los resultado de los análisis, plasmados en el Plano GE108-PL-III-06, gran parte del área de estudio se encuentra catalogada como de amenaza alta y muy alta (del orden del 30%, tal como se aprecia en la Figura 3-4), mientras que como de amenaza baja, se cataloga el área sin construir de la ladera estructural en arenisca, zona que no presenta características topográficas (alta pendiente) para la construcción de las viviendas típicas del sector; sin embargo, las viviendas allí construidas se catalogan puntualmente como de amenaza alta por los cortes y rellenos que deben realiza para la adecuación del terreno, dada la alta pendiente de este sitio (véase Figura 3-3). El número de viviendas afectadas para cada una de las categorías de amenaza se presenta en la Figura 3-5.

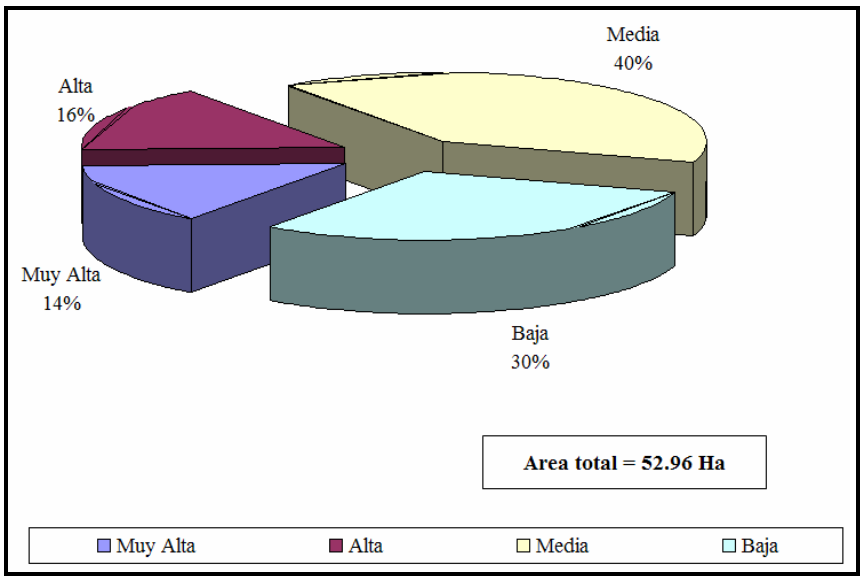


Figura 3-4. Distribución porcentual por área afectada de las categorías de amenaza en la zona de Nueva Esperanza

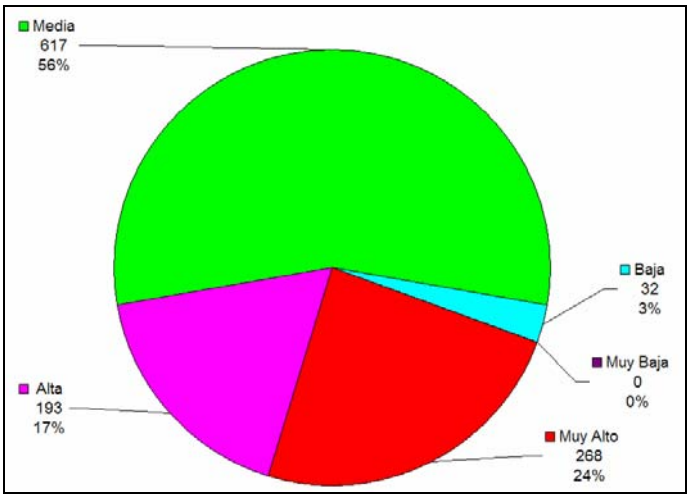


Figura 3-5. Número de viviendas afectadas para las diferentes categorías de amenaza[10]

El resumen de la categoría de amenaza para las viviendas construidas en cada uno de los sectores (ver Tomo II), se pueden observar de la Figura 3-6 a la Figura 3-9.

[10] No se incluyen los lotes vacios.

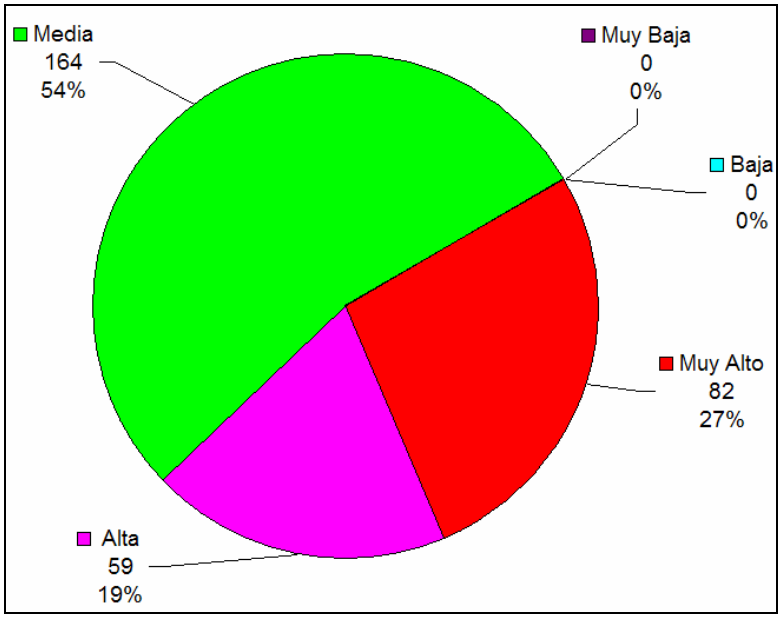


Figura 3-6. Viviendas afectas por categoría de amenaza para el sector 1

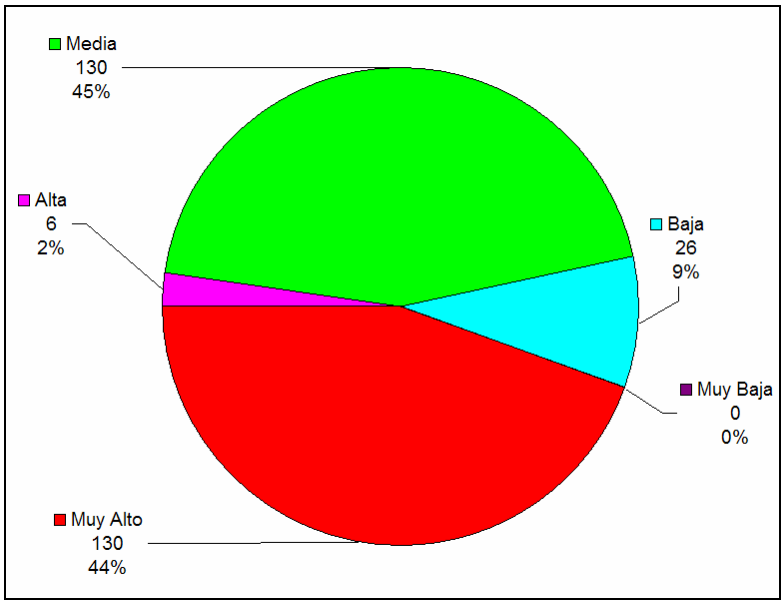


Figura 3-7. Viviendas afectas por categoría de amenaza para el sector 2

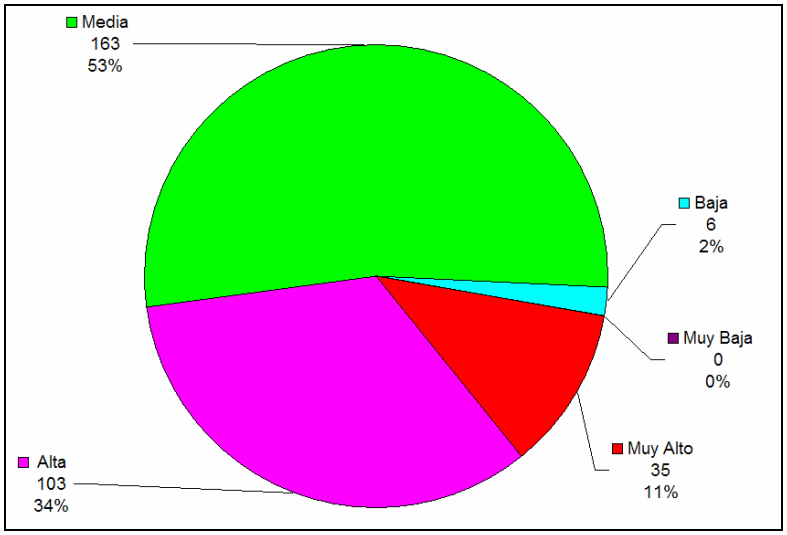


Figura 3-8. Viviendas afectas por categoría de amenaza para el sector 3

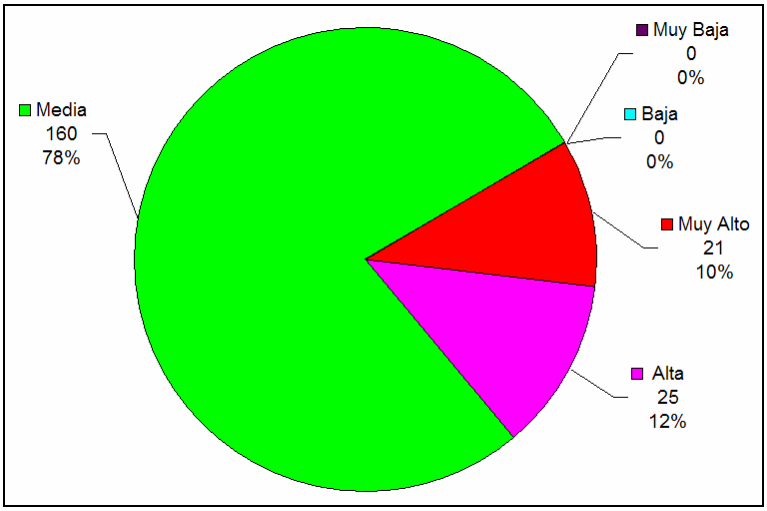


Figura 3-9. Viviendas afectas por categoría de amenaza para el sector 4

4. VULNERABILIDAD FÍSICA

4.1. Introducción

Como parte fundamental de los estudios de riesgo está la determinación de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Según la UNDRO[11], la vulnerabilidad significa: "el grado de pérdida de un elemento dado resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada y expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total)".

[11]UNDRO (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis.* Report of Expert Group Meeting. 9 - 12 July 1979.

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis realizados para determinar la vulnerabilidad física de las viviendas en la zona de estudio (sector de Nueva Esperanza) ante fenómenos de remoción en masa, para lo cual se realizaron los siguientes trabajos:

- Determinación de las características de cada una de las viviendas, realizando la encuesta (Inventario de Vivienda).
- Cálculo del Índice de Vulnerabilidad Física de cada una de las viviendas ante fenómenos de remoción en masa.
- Zonificación por Vulnerabilidad Física ante fenómenos de remoción en masa.

4.2. Objetivos

El objetivo principal de este capítulo es determinar la vulnerabilidad física de las viviendas de la zona de estudio, expresada como el daño máximo probable que puede sufrir la vivienda ante la ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa (deslizamiento o caída de rocas).

4.3. Metodología

Los análisis de vulnerabilidad se encaminaron a determinar los posibles daños en las edificaciones debido a los fenómenos de remoción en masa posibles en la zona (ver Capítulo 3). Para tal efecto, la vulnerabilidad se basó en el cálculo del denominado Índice de Vulnerabilidad Física (IVF), utilizando para tal efecto la metodología propuesta por Leone[12] y modificada por Soler et al[13]. En resumen, el trabajo consistió en:

- ♦ Clasificar la tipología de vivienda existente. Esta información se obtuvo de las encuestas realizadas (inventario de Viviendas).
- ♦ Calcular los índices de vulnerabilidad física (IVF), dependiendo del tipo de movimiento, la intensidad de las solicitaciones y las características del elemento expuesto (viviendas).

4.3.1. Tipificación de las viviendas

En forma general, la vulnerabilidad es una función tanto de la intensidad del fenómeno como de la resistencia del elemento expuesto. La primera variable ya se tuvo en cuenta en la evaluación de la amenaza; para la segunda variable (resistencia del elemento expuesto), se utilizará la tipificación de viviendas presentada en el Tomo II, y teniendo los criterios de resistencia presentados en la Tabla 4-1

[12] Leone, F. (1999) ***Concept de vulnerabilite appliquea L'evaluation des risques generes par les phenomenes de mouvements de terrein.*** Tesis de doctorado, Universidad de Grenoble.
[13] Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). ***Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia.*** XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

Tabla 4-1. Criterios de resistencia de las estructuras según el tipo de solicitación[14].

Tipo de solicitación	Modos de daño	Criterio de resistencia de la estructura
Desplazamientos laterales	Transporte. Deformación. Asentamientos. Ruptura.	Profundidad de la cimentación. Arriostramiento de la estructura.
Empujes laterales	Deformación. Ruptura.	Altura de la estructura. Profundidad de la cimentación. Refuerzo.
Impactos	Deformación. Ruptura.	Refuerzo.

4.3.2. Calificación de los daños

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 4-2. Clasificación de los daños según el DRM

Índice de daño	Tipo de daño	Porcentaje de daño
I	Daños ligeros no estructurales. Estabilidad no afectada.	0.0 - 0.1
II	Fisuración de paredes (muros). Reparaciones no urgentes.	0.2 - 0.3
III	Deformaciones importantes. Daños 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 pérdidas (IP) lo define Leone, como:

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

Donde,

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

[14] Adaptado de Leone (1996)

4.3.3. Matriz de daño

Se asocian los Índices de Daños Potenciales (IDp) ocasionados por un evento dado, de acuerdo tanto al tipo de solicitud (magnitud del evento) como a la tipología de la vivienda (resistencia del elemento expuesto). A continuación se presenta la matriz de daño utilizada.

Tabla 4-3. Matriz de daño utilizada en el estudio[15].

	CLASE DE SOLICITACIÓN	TIPOLOGÍA DE VIVIENDA			
		B1	B2	B3	B4
IMPACTOS	EC1	V	V	V	IV
	EC2	V	V	IV	III
	EC3	V	IV	III	II
	EC4	IV	III	II	I
	EC5	III	II	II	I
DESPLAZAMIENTOS LATERALES	VM1	V	V	V	IV
	VM2	V	V	IV	IV
	VM3	V	IV	III	III
	VM4	IV	III	III	II
	VM5	III	II	I	I

2.1.1. Índice de vulnerabilidad física (IVF)

Para la cuantificación de los dos índices de daño determinados anteriormente (IDa y IDi) se utilizó la teoría de los conjuntos difusos (ver Figura 4-1), adoptando la metodología utilizada para la evaluación de daños durante sismos[16]; de esta forma se determina el porcentaje de daño o índice de pérdidas (IPa, asociado al IDa; y el IPi, asociado al IDi). Estos porcentajes de pérdidas, dependen del nivel de confianza en la valoración; en este caso se adoptó que, para una confianza de 1.0, los rangos de valores de cada ID fueran los propuestos por Leone (1996). Para efectos de los cálculos se tomó una confianza de 0.5 (ver Tabla 4-4).

[15] Ver Tablas 4.3. para el tipo de daño y Tablas 3.2, 3.3 y 3.4 para el tipo de solicitación.
[16] Sánchez-Silva, M. Taylor, C.A. & Blockley, D.I. *HAZARD MANAGEMENT OF PROJECTS IN A EARTHQUAKE.* In: Applications of Statistics an Probability. Lemaire, Favre & Marbarki (eds). Balkema, Rotterdam. 1995.

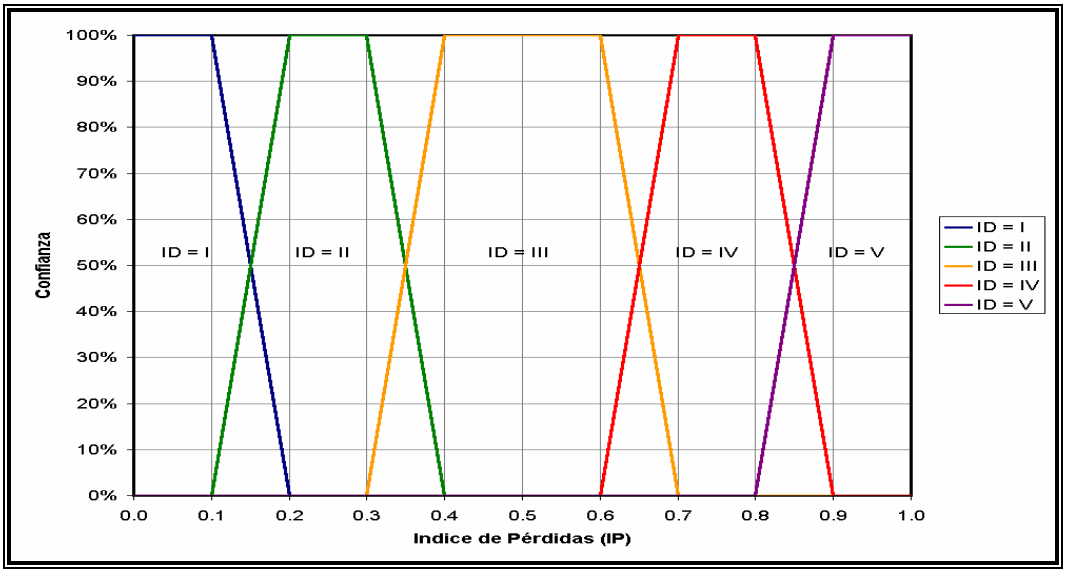


Figura 4-1. Valoración del ID utilizando conjuntos difusos

Tabla 4-4. Valores de IP utilizados para valorar el ID en el estudio.

Índice de Daño	IP MIN	IP MAX
I	0.00	0.15
II	0.15	0.35
III	0.35	0.65
IV	0.65	0.85
V	0.85	1.00

4.4. Categorización de la vulnerabilidad

Para cada uno de las posibles solicitaciones asociadas a la amenaza (desplazamientos laterales, empujes o impactos), se determinaron las viviendas afectadas determinando su Índice de Vulnerabilidad Física (IVF). Debido a que algunas de las viviendas pueden ser afectadas por más de un tipo de solicitación, se determinó que el IVF total sea la unión de los tres anteriores (puede ocurrir cualquiera de los tres).

La vulnerabilidad se categoriza según el valor de los IVF totales, en cinco categorías, dependiendo de a que valor se acerque más según lo expresado en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Categorización de la vulnerabilidad física

CATEGORÍA VULNERABILIDAD	CRITERIO
MUY ALTA	Las pérdidas en caso de ocurrir el fenómeno son mayores al 90%.
ALTA	Las pérdidas en caso de ocurrir el fenómeno son del orden del 75%.
MEDIA	Las pérdidas en caso de ocurrir el fenómeno son del orden del 50%.
BAJA	Las pérdidas en caso de ocurrir el fenómeno son del orden del 25%.
MUY BAJA	Las pérdidas en caso de ocurrir el fenómeno son menores al 10%

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se realizaron los siguientes planos:

- Plano GE108-PL-II-07. Vulnerabilidad física por FRM.
- Plano GE108-PL-II-08. Vulnerabilidad física por desplazamientos.
- Plano GE108-PL-II-09. Vulnerabilidad física por caída de rocas.
- Plano GE108-PL-II-10. Vulnerabilidad física por empujes.

A continuación se presentan las gráficas resumen del número de viviendas según su categoría de vulnerabilidad para toda la zona de estudio y los cuatro sectores en que se dividió (ver Figura 4-2 a Figura 4-6).

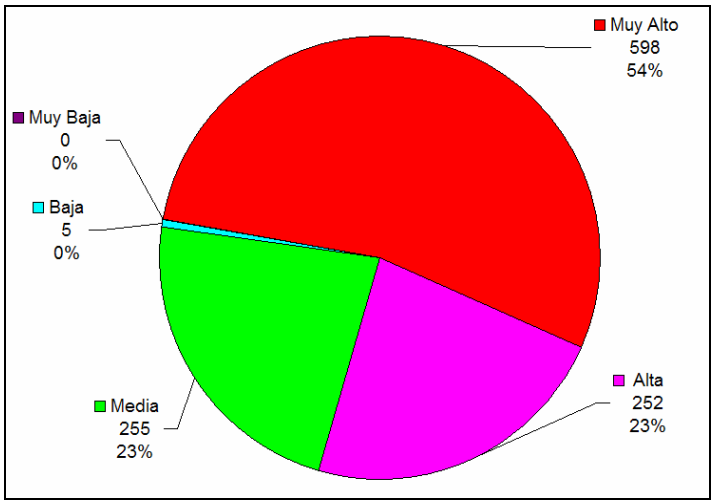


Figura 4-2. Viviendas según su categoría de vulnerabilidad física para la zona de Nueva Esperanza

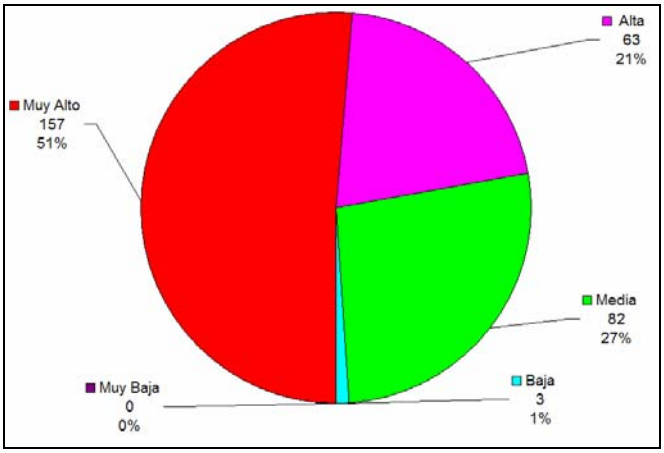


Figura 4-3. Viviendas según su categoría de vulnerabilidad física para el sector 1

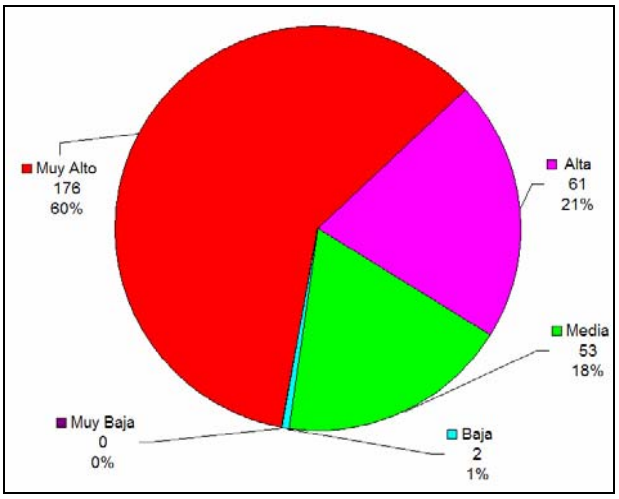


Figura 4-4. Viviendas según su categoría de vulnerabilidad física para el sector 2

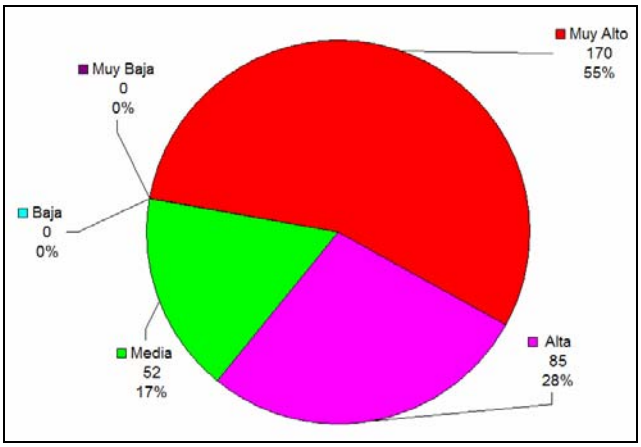


Figura 4-5. Viviendas según su categoría de vulnerabilidad física para el sector 3

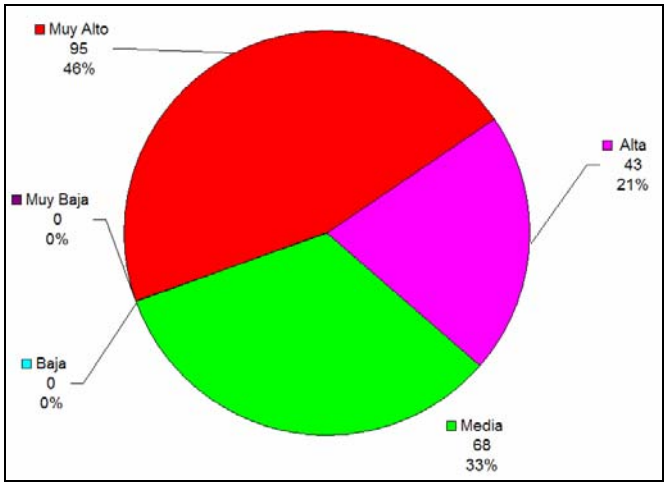


Figura 4-6. Viviendas según su categoría de vulnerabilidad física para el sector 4

5. RIESGO FÍSICO

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan las labores realizadas para determinar el riesgo que cada una de las edificaciones que se encuentran dentro del área de estudio tienen ante fenómenos de remoción en masa, teniendo en cuenta los resultados de amenaza y vulnerabilidad presentados en los capítulos 3 y 4, respectivamente.

5.2. Metodología

Una vez determinado el IVF para cada uno de los lotes (edificaciones), el riesgo se calcula como la multiplicación de la probabilidad de falla por el IVF, o sea:

$$IR = Pf * IVF$$

5.3. Zonificación por riesgo físico

De igual manera que la vulnerabilidad, el riesgo se caracterizó con base en el índice de riesgo físico, teniendo en cuenta la unión de los índices individuales de desplazamientos, empujes y/o impactos, catalogándolo dependiendo de las pérdidas esperadas a nivel anual, tal como se presenta en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Criterio de categorización del riesgo de las edificaciones por fenómenos de remoción en masa

CATEGORÍA DEL RIESGO	CRITERIO
MUY ALTA	Las pérdidas esperadas anuales superan el 50% (IR promedio≥ 0.5)
ALTA	Las pérdidas esperadas anuales son del orden del 25% (IR promedio = 0.25)
MEDIA	Las pérdidas esperadas anuales son del orden del 10% (IR promedio = 0.10)
BAJA	Las pérdidas esperadas anuales son del orden del 5% (IR promedio = 0.05)
MUY BAJA	Las pérdidas esperadas anuales son del orden del 1% (IR promedio = 0.01)

Con este índice de riesgo se pueden determinar las pérdidas económicas directas esperadas al multiplicarlo por el valor de las viviendas. La categoría de riesgo de cada uno de las edificaciones del barrio Nueva Esperanza se presentan en los siguientes planos:

- Plano GE108-PL-III-11. Riesgo físico por FRM.
- Plano GE108-PL-III-12. Riesgo físico por desplazamientos.
- Plano GE108-PL-III-13. Riesgo físico por caída de rocas.
- Plano GE108-PL-III-14. Riesgo físico por empujes.

Como se puede observa en la Figura 5-1, más del 70% de las viviendas (correspondiente a 778 viviendas de las 1100 casas construidas en la zona al realizar los trabajos) se catalogan como de riesgo físico alto o muy alto.

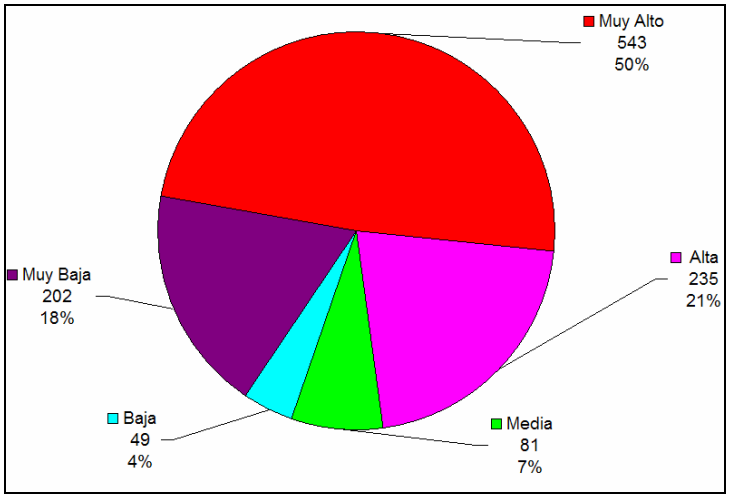


Figura 5-1. Viviendas según su categoría de riesgo físico en la zona de Nueva Esperanza

A continuación se presenta las gráficas resumen del número de viviendas por categoría de riesgo para cada uno de los sectores en que se dividió la zona de estudio.

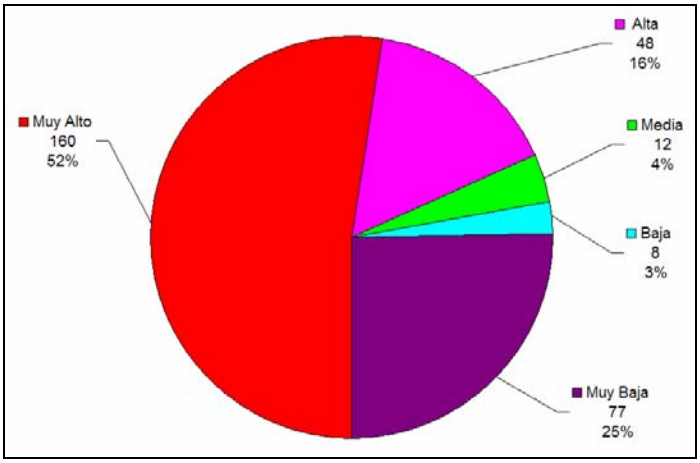


Figura 5-2. Viviendas según su categoría de riesgo físico en el sector 1

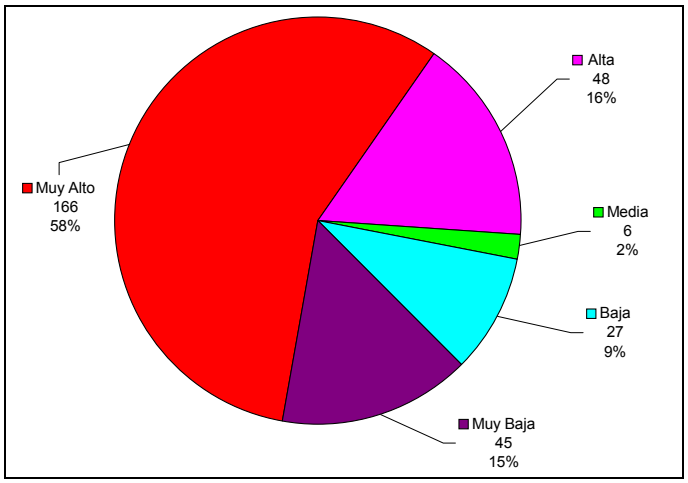


Figura 5-3. Viviendas según su categoría de riesgo físico en el sector 2

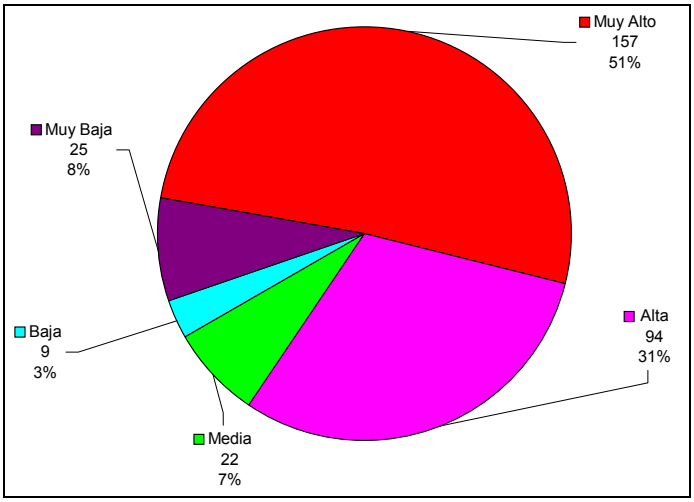


Figura 5-4. Viviendas según su categoría de riesgo físico en el sector 3

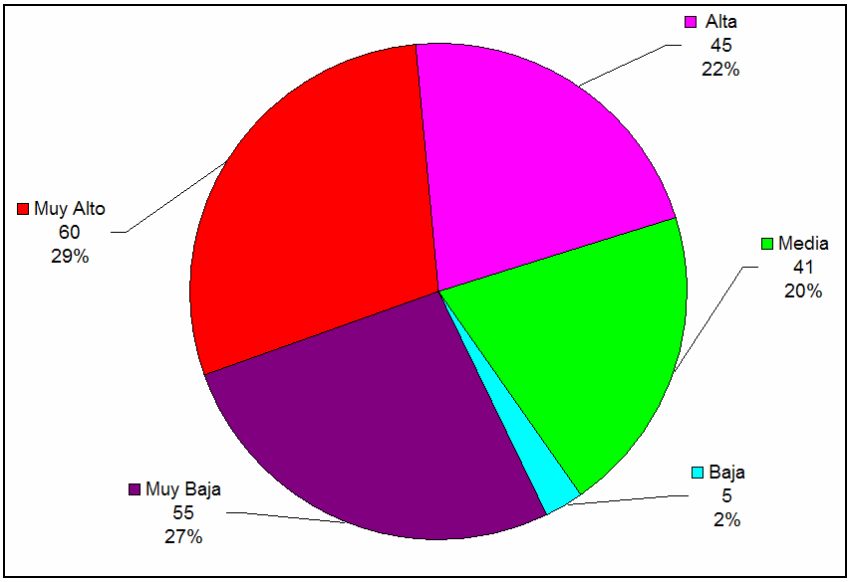


Figura 5-5. Viviendas según su categoría de riesgo físico en el sector 4

6. RIESGO HOLÍSTICO

6.1. Introducción

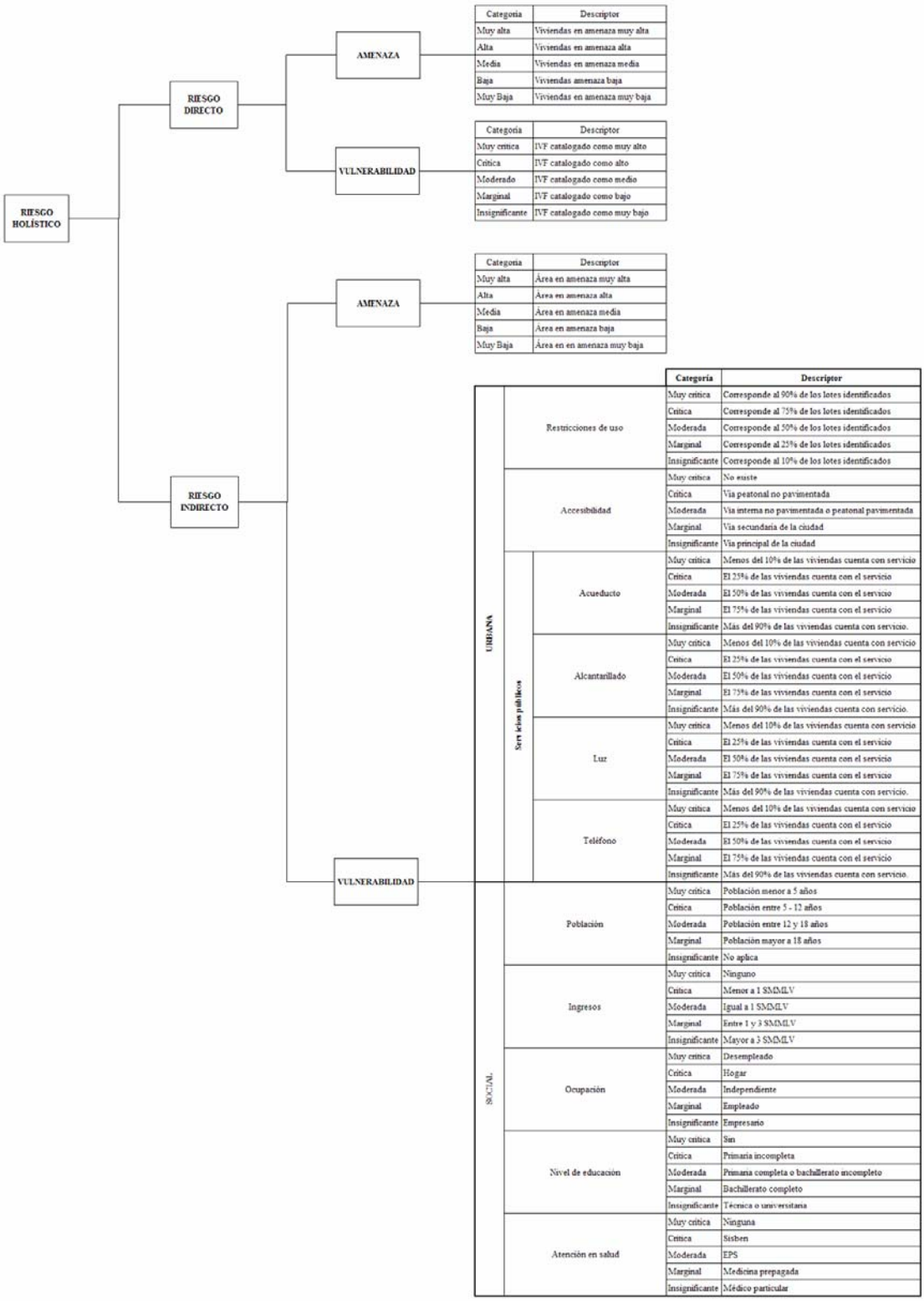
Los resultados del análisis de vulnerabilidad y riesgo físico, representan el peligro físico directo sobre las viviendas ante fenómenos de remoción en masa. Sin embargo, dadas las condiciones sociales, urbanas y ambientales de la zona se hace necesario realizar una evaluación del riesgo desde un punto de vista más global, tratando de involucrar las diferentes variables que intervienen en el proceso de urbanización de la zona, y que sirva como herramienta para la toma de decisiones y la gestión del riesgo.

Para ello, la estimación del riesgo se realiza desde un punto de vista holístico, utilizando la técnica de valoración por conjuntos difusos y la podenración de variables por la técnica "AHP" (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS).

Para efectos del análisis de riesgo holístico y realizar comparaciones se tomaron como sectores de análisis los cuatro (4) sectores en que se dividió la zona (ver Tomo II).

6.2. Metodología

El método consiste en valorar por índices cualitativos diferentes variables (véase Figura 6-1), dando una valoración numérica mediante la utilización de conjuntos difusos (véase Figura 6-2).



Categoria	Descriptor
Muy alta	Viviendas en amenaza muy alta
Alta	Viviendas en amenaza alta
Media	Viviendas en amenaza media
Baja	Viviendas amenaza baja
Muy Baja	Viviendas en amenaza muy baja

Categoria	Descriptor
Muy critica	IVF catalogado como muy alto
Critica	IVF catalogado como alto
Moderado	IVF catalogado como medio
Marginal	IVF catalogado como bajo
Insignificante	IVF catalogado como muy bajo

Categoria	Descriptor
Muy alta	Área en amenaza muy alta
Alta	Área en amenaza alta
Media	Área en amenaza media
Baja	Área en amenaza baja
Muy Baja	Área en en amenaza muy baja

			Categoria	Descriptor
URBANA	Restricciones de uso		Muy critica	Corresponde al 90% de los lotes identificados
			Critica	Corresponde al 75% de los lotes identificados
			Moderada	Corresponde al 50% de los lotes identificados
			Marginal	Corresponde al 25% de los lotes identificados
			Insignificante	Corresponde al 10% de los lotes identificados
	Accesibilidad		Muy critica	No existe
			Critica	Via peatonal no pavimentada
			Moderada	Via interna no pavimentada o peatonal pavimentada
			Marginal	Via secundaria de la ciudad
			Insignificante	Via principal de la ciudad
	Servicios publicos	Acueducto	Muy critica	Menos del 10% de las viviendas cuenta con servicio
			Critica	El 25% de las viviendas cuenta con el servicio
			Moderada	El 50% de las viviendas cuenta con el servicio
			Marginal	El 75% de las viviendas cuenta con el servicio
			Insignificante	Más del 90% de las viviendas cuenta con servicio.
		Alcantarillado	Muy critica	Menos del 10% de las viviendas cuenta con servicio
			Critica	El 25% de las viviendas cuenta con el servicio
			Moderada	El 50% de las viviendas cuenta con el servicio
			Marginal	El 75% de las viviendas cuenta con el servicio
			Insignificante	Más del 90% de las viviendas cuenta con servicio.
		Luz	Muy critica	Menos del 10% de las viviendas cuenta con servicio
			Critica	El 25% de las viviendas cuenta con el servicio
			Moderada	El 50% de las viviendas cuenta con el servicio
			Marginal	El 75% de las viviendas cuenta con el servicio
			Insignificante	Más del 90% de las viviendas cuenta con servicio.
		Teléfono	Muy critica	Menos del 10% de las viviendas cuenta con servicio
			Critica	El 25% de las viviendas cuenta con el servicio
			Moderada	El 50% de las viviendas cuenta con el servicio
			Marginal	El 75% de las viviendas cuenta con el servicio
			Insignificante	Más del 90% de las viviendas cuenta con servicio.
SOCIAL	Población		Muy critica	Población menor a 5 años
			Critica	Población entre 5 - 12 años
			Moderada	Población entre 12 y 18 años
			Marginal	Población mayor a 18 años
			Insignificante	No aplica
	Ingresos		Muy critica	Ninguno
			Critica	Menor a 1 SMMLV
			Moderada	Igual a 1 SMMLV
			Marginal	Entre 1 y 3 SMMLV
			Insignificante	Mayor a 3 SMMLV
	Ocupación		Muy critica	Desempleado
			Critica	Hogar
			Moderada	Independiente
			Marginal	Empleado
			Insignificante	Empresario
	Nivel de educación		Muy critica	Sin
			Critica	Primaria incompleta
			Moderada	Primaria completa o bachillerato incompleto
			Marginal	Bachillerato completo
			Insignificante	Técnica o universitaria
	Atención en salud		Muy critica	Ninguna
			Critica	Sisben
			Moderada	EPS
			Marginal	Medicina prepagada
			Insignificante	Médico particular

Figura 6-1. Variables para la valoración del riesgo holístico

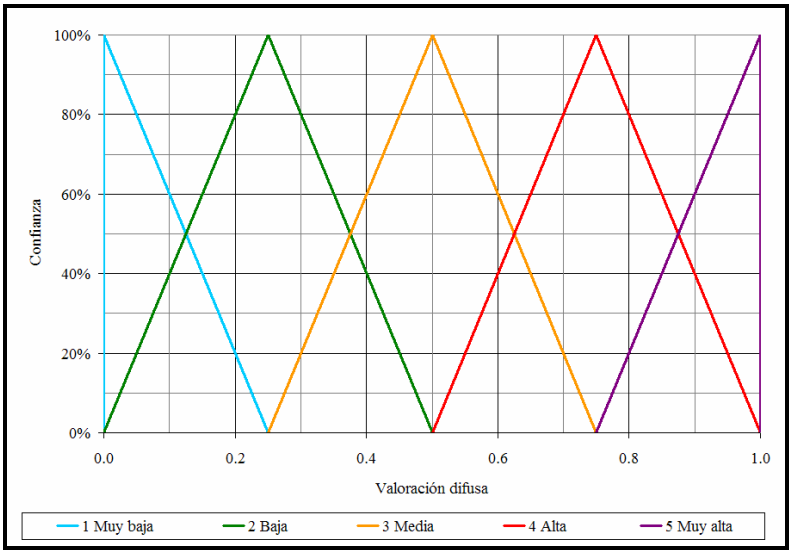


Figura 6-2. Valoración difusa utilizada en los análisis

Además, para dar una poderación a las diferentes variables, se utilizó la técnica AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS) creada por el señor THOMAS L. SAATY[17], muy adecuada para generar modelos de TOMA DE DECICIONES en problemas decisionales NO-ESTRUCTURADOS, típicos en la Gerencia Pública, como es el caso del estudio del manejo riesgo de origen natular en en el barrio Nueva Esperanza. La técnica AHP, utiliza el método de valoración por pares, utilizando para tal efecto la importancia relativa presentada en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Importancia relativa de importancia en la valoración por pares, técnica AHP

IMPORTANCIA / PREFERENCIA	INTENSIDAD	SIGNIFICADO
1	Igual o diferente a...	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos
3	Ligeramente más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo
5	Más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo
7	Mucho más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más importante o preferido que el segundo
9	Absolutamente o muchísimo más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo

[17] Ver: Decisión Making for leaders – The analytical Hierarchy process for decisions in a Complex World – LIFETIME LEARNING PUBLICATIONS, además de otras publicaciones del mismo autor.

6.3. Amenaza

Con base en los resultados de los análisis de amenaza presentados anteriormente, se categoriza el nivel de amenaza del sector teniendo en cuenta el número de viviendas afectadas (para determinar el riesgo físico directo sobre las viviendas) y el área afectada por la diferentes zonas de amenaza (para el riesgo indirecto). A continuación se presenta el resumen de la evaluación por conjuntos difusos de cada una de estos descriptores de la amenaza.

6.3.1. Viviendas afectadas

El número de viviendas afectadas en cada una de las categorías de amenaza estipuladas y para cada una de las zonas se pueden observar en la Figura 3-6 a la Figura 3-9. El valor promedio del número difuso y su respectiva categorización (por desfuzzificación, hallando el centroide del área del conjunto difuso) para cada uno de los sectores se presenta a continuación.

Tabla 6-2. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo directo del sector 1

Descriptor	Valor
Viviendas en amenaza muy alta	82
Viviendas en amenaza alta	59
Viviendas en amenaza media	164
Viviendas amenaza baja	0
Viviendas en amenaza muy baja	0
Número difuso	0.66
Categoría	Alta

Tabla 6-3. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo directo del sector 2

Descriptor	Valor
Viviendas en amenaza muy alta	130
Viviendas en amenaza alta	6
Viviendas en amenaza media	130
Viviendas amenaza baja	26
Viviendas en amenaza muy baja	0
Número difuso	0.66
Categoría	Alta

Tabla 6-4. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo directo del sector 3

Descriptor	Valor
Viviendas en amenaza muy alta	35
Viviendas en amenaza alta	103
Viviendas en amenaza media	163
Viviendas amenaza baja	6
Viviendas en amenaza muy baja	0
Número difuso	0.62
Categoría	Media

Tabla 6-5. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo directo del sector 4

Descriptor	Valor
Viviendas en amenaza muy alta	21
Viviendas en amenaza alta	25
Viviendas en amenaza media	160
Viviendas amenaza baja	0
Viviendas en amenaza muy baja	0
Número difuso	0.57
Categoría	Media

6.3.2. Área afectada

Para la valoración del riesgo físico indirecto se utilizó como variable de identificación de la amenaza el porcentaje de área afectada con respecto al área total del sector dependiendo de la categoría de amenaza establecida (ver numeral 3 de este tomo). Los resultados obtenidos para cada uno de los sectores de análisis se presentan a continuación (véase Tabla 6-6 a Tabla 6-9).

Tabla 6-6. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo indirecto del sector 1

Descriptor	Valor
Área de amenaza muy alta	10%
Área amenaza alta	17%
Área de amenaza media	35%
Área de amenaza baja	38%
Área de amenaza muy baja	0
Número difuso	0.48
Categoría	Media

Tabla 6-7. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo indirecto del sector 2

Descriptor	Valor
Área de amenaza muy alta	29%
Área amenaza alta	10%
Área de amenaza media	39%
Área de amenaza baja	22%
Área de amenaza muy baja	0
Número difuso	0.59
Categoría	Media

Tabla 6-8. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo indirecto del sector 3

Descriptor	Valor
Área de amenaza muy alta	13%
Área amenaza alta	23%
Área de amenaza media	50%
Área de amenaza baja	14%
Área de amenaza muy baja	0
Número difuso	0.57
Categoría	Media

Tabla 6-9. Valoración difusa de los descriptores de la amenaza para el riesgo indirecto del sector 4

Descriptor	Valor
Área de amenaza muy alta	6%
Área amenaza alta	13%
Área de amenaza media	69%
Área de amenaza baja	12%
Área de amenaza muy baja	0
Número difuso	0.53
Categoría	Media

6.4. Vulnerabilidad

6.4.1. Vulnerabilidad física

Para determinar la calificación de la vulnerabilidad física se tomaron los resultados de los análisis del IVF presentados en el numeral 4. Los resultados de los análisis se presentan para cada uno de los sectores de estudio en la Tabla 6-10 a la Tabla 6-13.

Tabla 6-10. Categorización de las viviendas según el IVF para el sector 1

Descriptor	Valor
Viviendas con IVF muy alto	157
Viviendas con IVF alto	63
Viviendas con IVF medio	82
Viviendas con IVF muy alto	3
Viviendas con IVF bajo	0
Número difuso	0.76
Categoría	Crítica

Tabla 6-11. Categorización de las viviendas según el IVF para el sector 2

Descriptor	Valor
Viviendas con IVF muy alto	176
Viviendas con IVF alto	61
Viviendas con IVF medio	53
Viviendas con IVF muy alto	2
Viviendas con IVF bajo	0
Número difuso	0.79
Categoría	Crítica

Tabla 6-12. Categorización de las viviendas según el IVF para el sector 3

Descriptor	Valor
Viviendas con IVF muy alto	170
Viviendas con IVF alto	85
Viviendas con IVF medio	52
Viviendas con IVF muy alto	0
Viviendas con IVF bajo	0
Número difuso	0.79
Categoría	Crítica

Tabla 6-13. Categorización de las viviendas según el IVF para el sector 4

Descriptor	Valor
Viviendas con IVF muy alto	95
Viviendas con IVF alto	43
Viviendas con IVF medio	68
Viviendas con IVF muy alto	0
Viviendas con IVF bajo	0
Número difuso	0.74
Categoría	Crítica

6.4.2. Vulnerabilidad del contexto

6.4.2.1. Vulnerabilidad urbana

Los descriptores para la valoración de la vulnerabilidad urbana utilizados son:

- Restricciones de uso
- Accesibilidad
- Servicios públicos: acueducto, alcantarillado, luz y teléfono.

La dos últimas variables, al no tenerse un parámetro de medición en la escala de trabajo, se procedieron a valorarse por juicios de expertos, teniendo como base el análisis de diagnóstico presentado en el Tomo II.

Para determinar la importancia de las tres variables dentro de la evaluación, se realizó el análisis AHP obteniendo de la valoración por pares (ver Tabla 6-14) y los pesos de importancia presentados en la Tabla 6-15.

Tabla 6-14. Valoración por pares de las variables de la vulnerabilidad urbana

Variable 1	Variable 2	VALORACION POR PARES
Restricciones de uso	Accesibilidad	6.00
Restricciones de uso	Servicios públicos	3.00
Accesibilidad	Servicios públicos	0.33

Tabla 6-15. Pesos de importancia de las variables de la vulnerabilidad urbana

Variable	Peso
Restricciones de uso	65%
Accesibilidad	10%
Servicios públicos	25%

Restricciones de uso

Para las restricciones de uso, se tomó el porcentaje de lotes que presenta restricciones de su uso como zona residencial, como son: zona del PEDEN, zona de ronda hidráulica de la quebrada la Guairita y zona de alta tensión. Los resultados para cada una de los sectores de estudio se presenta a continuación.

Tabla 6-16. Porcentaje de lotes localizados en áreas restringidas para los diferentes sectores

Sector	Porcentaje de lotes ubicados en áreas restringidas	Categoría	Número difuso
1	54%	Moderada	0.50
2	4%	Insignificante	0.10
3	23%	Marginal	0.25
4	52%	Moderada	0.50

Accesibilidad

Se obtuvieron las siguientes categorías para la evaluación por expertos de la accesibilidad a cada una de los sectores de estudio.

Tabla 6-17. Accesibilidad a cada uno de los sectores

Sector	Accesibilidad	Categoría	Número difuso
1	No existe	Muy crítica	0.90
2	Vía peatonal no pavimentada	Crítica	0.75
3	Vía interna no pavimentada	Moderada	0.50
4	Vía interna no pavimentada	Moderada	0.50

Servicios públicos

Con la valoración presentada en la Tabla 6-18, se pueden obtener los pesos de importancia dentro de la valoración para las cuatro variables de servicios públicos analizadas, tal como se presenta en la Tabla 6-19.

Tabla 6-18. Valoración por pares para las variables de servicios públicos

Variable 1	Variable 2	VALORACION POR PARES
Acueducto	Alcantarillado	0.5
Acueducto	Luz	7
Acueducto	Teléfono	9
Alcantarillado	Luz	7
Alcantarillado	Teléfono	9
Luz	Teléfono	3

Tabla 6-19. Pesos de importancia de las variables de servicios públicos

Variable	Peso de importancia
Alcantarillado	52%
Acueducto	36%
Luz	8%
Teléfono	4%

La valoración de los servicios públicos para cada uno de los sectores se presenta a continuación

Tabla 6-20. Valoración de la categoría de vulnerabilidad para servicios públicos para el sector 1

Variable	Peso de importancia	Categoría individual	Número difuso	Categoría
Alcantarillado	52%	Muy crítica	0.89	Muy crítica
Acueducto	36%	Muy crítica		
Luz	8%	Crítica		
Teléfono	4%	Muy crítica		

Tabla 6-21. Valoración de la categoría de vulnerabilidad para servicios públicos para el sector 2

Variable	Peso de importancia	Categoría individual	Número difuso	Categoría
Alcantarillado	52%	Crítica	0.74	Crítica
Acueducto	36%	Crítica		
Luz	8%	Moderada		
Teléfono	4%	Muy crítica		

Tabla 6-22. Valoración de la categoría de vulnerabilidad para servicios públicos para el sector 3

Variable	Peso de importancia	Categoría individual	Número difuso	Categoría
Alcantarillado	52%	Crítica	0.73	Crítica
Acueducto	36%	Crítica		
Luz	8%	Moderada		
Teléfono	4%	Crítica		

Tabla 6-23. Valoración de la categoría de vulnerabilidad para servicios públicos para el sector 4

Variable	Peso de importancia	Categoría individual	Número difuso	Categoría
Alcantarillado	52%	Crítica	0.73	Crítica
Acueducto	36%	Crítica		
Luz	8%	Moderada		
Teléfono	4%	Crítica		

6.4.2.2. Vulnerabilidad social

Los parámetros de evaluación para la vulnerabilidad social utilizados fueron:

- Población.
- Ingresos.
- Ocupación
- Nivel de educación.
- Atención en salud.

La valoración AHP para estas cinco variables se presenta a continuación (ver Tabla 6-24 y Tabla 6-25).

Tabla 6-24. Valoración por pares para las variables sociales

Variable 1	Variable 2	VALORACION POR PARES
Población infantil	Nivel de ingresos	1
Población infantil	Ocupación	1
Población infantil	Nivel de educación	3
Población infantil	Atención en salud	3
Nivel de ingresos	Ocupación	2
Nivel de ingresos	Nivel de educación	3
Nivel de ingresos	Atención en salud	2
Ocupación	Nivel de educación	3
Ocupación	Atención en salud	2
Nivel de educación	Atención en salud	1

Tabla 6-25. Pesos de importancia de las variables sociales

Variable	Peso de importancia
Población	26%
Ingresos	31%
Ocupación	23%
Nivel de educación	9%
Atención en salud	11%

<u>Población</u>

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de la variable población en cada uno de los sitios de análisis.

Tabla 6-26. Valoración de la variable población en el sector 1

Descriptor	Valor
Menores de 5 Años	16 %
Niños entre los 5 y los 12 años	25 %
Jóvenes entre los 12 y los 18 años	15 %
Mayores de 18 años	44 %
No aplica	0 %
Número difuso	0.52
Categoría	Moderada

Tabla 6-27. Valoración de la variable población en el sector 2

Descriptor	Valor
Menores de 5 Años	13 %
Niños entre los 5 y los 12 años	23 %
Jóvenes entre los 12 y los 18 años	16 %
Mayores de 18 años	48 %
No aplica	0 %
Número difuso	0.49
Categoría	Moderada

Tabla 6-28. Valoración de la variable población en el sector 3

Descriptor	Valor
Menores de 5 Años	16 %
Niños entre los 5 y los 12 años	22 %
Jóvenes entre los 12 y los 18 años	14 %
Mayores de 18 años	48 %
No aplica	0 %
Número difuso	0.50
Categoría	Moderada

Tabla 6-29. Valoración de la variable población en el sector 4

Descriptor	Valor
Menores de 5 Años	12 %
Niños entre los 5 y los 12 años	27 %
Jóvenes entre los 12 y los 18 años	12 %
Mayores de 18 años	49 %
No aplica	0 %
Número difuso	0.49
Categoría	Moderada

Ingresos

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de la variable ingresos en cada uno de los sitios de análisis.

Tabla 6-30. Valoración de la variable ingreso en el sector 1

Descriptor	Valor
Ninguno	0 %
Menor a 1 SMMLV	68 %
Igual a 1 SMMLV	29 %
Entre 1 SMMLV y 2 SMMLV	3 %
Mayor a 2 SMMLV	0 %
Número difuso	0.66
Categoría	Crítica

Tabla 6-31. Valoración de la variable ingreso en el sector 2

Descriptor	Valor
Ninguno	0 %
Menor a 1 SMMLV	61 %
Igual a 1 SMMLV	36 %
Entre 1 SMMLV y 2 SMMLV	3 %
Mayor a 2 SMMLV	0 %
Número difuso	0.65
Categoría	Critica

Tabla 6-32. Valoración de la variable ingreso en el sector 3

Descriptor	Valor
Ninguno	0 %
Menor a 1 SMMLV	66 %
Igual a 1 SMMLV	29 %
Entre 1 SMMLV y 2 SMMLV	5 %
Mayor a 2 SMMLV	0 %
Número difuso	0.65
Categoría	Crítica

Tabla 6-33. Valoración de la variable ingreso en el sector 4

Descriptor	Valor
Ninguno	0 %
Menor a 1 SMMLV	62 %
Igual a 1 SMMLV	38 %
Entre 1 SMMLV y 2 SMMLV	0 %
Mayor a 2 SMMLV	0 %
Número difuso	0.66
Categoría	Crítica

Ocupación

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de la variable ocupación en cada uno de los sitios de análisis.

Tabla 6-34. Valoración de la variable ocupación en el sector 1

Descriptor	Valor
Desempleado	79 %
Hogar	13 %
Independiente	8 %
Empleado	0 %
Empresario	0 %
Número difuso	0.85
Categoría	Muy crítica

Tabla 6-35. Valoración de la variable ocupación en el sector 2

Descriptor	Valor
Desempleado	75 %
Hogar	14 %
Independiente	11 %
Empleado	0 %
Empresario	0 %
Número difuso	0.84
Categoría	Muy crítica

Tabla 6-36. Valoración de la variable ocupación en el sector 3

Descriptor	Valor
Desempleado	72 %
Hogar	14 %
Independiente	14 %
Empleado	0 %
Empresario	0 %
Número difuso	0.82
Categoría	Crítica

Tabla 6-37. Valoración de la variable ocupación en el sector 4

Descriptor	Valor
Desempleado	76 %
Hogar	11 %
Independiente	13 %
Empleado	0 %
Empresario	0 %
Número difuso	0.83
Categoría	Muy crítica

Nivel de educación

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de la variable nivel de educación, en cada uno de los sitios de análisis.

Tabla 6-38. Valoración de la variable nivel de educación en el sector 1

Descriptor	Valor
Sin	0 %
Primaria incompleta	56 %
Primaria completa o bachillerato incompleto	40 %
Bachillerato completo	4 %
Técnica o universitaria	0 %
Número difuso	0.63
Categoría	Crítica

Tabla 6-39. Valoración de la variable nivel de educación en el sector 2

Descriptor	Valor
Sin	0 %
Primaria incompleta	51 %
Primaria completa o bachillerato incompleto	43 %
Bachillerato completo	5 %
Técnica o universitaria	1 %
Número difuso	0.61
Categoría	Moderada

Tabla 6-40. Valoración de la variable nivel de educación en el sector 3

Descriptor	Valor
Sin	0 %
Primaria incompleta	44 %
Primaria completa o bachillerato incompleto	49 %
Bachillerato completo	7 %
Técnica o universitaria	0 %
Número difuso	0.59
Categoría	Moderada

Tabla 6-41. Valoración de la variable nivel de educación en el sector 4

Descriptor	Valor
Sin	0 %
Primaria incompleta	54 %
Primaria completa o bachillerato incompleto	41 %
Bachillerato completo	5 %
Técnica o universitaria	0 %
Número difuso	0.62
Categoría	Moderada

Atención en salud

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de la variable atención en salud, en cada uno de los sitios de análisis.

Tabla 6-42. Valoración de la variable atención en salud en el sector 1

Descriptor	Valor
Ninguna	23 %
Sisben	65 %
EPS	12 %
Medicina prepagada	0 %
Médico particular	0 %
Número difuso	0.75
Categoría	Crítica

Tabla 6-43. Valoración de la variable atención en salud en el sector 2

Descriptor	Valor
Ninguna	21 %
Sisben	62 %
EPS	17 %
Medicina prepagada	0 %
Médico particular	0 %
Número difuso	0.74
Categoría	Crítica

Tabla 6-44. Valoración de la variable atención en salud en el sector 3

Descriptor	Valor
Ninguna	22 %
Sisben	58 %
EPS	20 %
Medicina prepagada	0 %
Médico particular	0 %
Número difuso	0.73
Categoría	Crítica

Tabla 6-45. Valoración de la variable atención en salud en el sector 4

Descriptor	Valor
Ninguna	20 %
Sisben	69 %
EPS	11 %
Medicina prepagada	0 %
Médico particular	0 %
Número difuso	0.75
Categoría	Crítica

6.5. Riesgo

6.5.1. Matriz de aceptabilidad del riesgo

Una vez realizada la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad desde el punto de vista holístico, se realiza la categorización del riesgo de acuerdo con la matriz de aceptabilidad el riesgo presentada a continuación (véase Tabla 6-46). Es de anotar que dado que las valoración son "difusas", en la zona considerada como tolerable se debe considerar que es una valoración de transición entre el riesgo "aceptable" e "inaceptable", y en algunos casos puede que la combinación amenaza – vulnerabilidad en esta zona se califique como riesgo "aceptable" o "inaceptable", ya bien sea cuando el número difuso (centroide de área) se acerque más a la calificación de una u otra, respectivamente.

Tabla 6-46. Matriz de aceptabilidad del riesgo

Categoría de amenaza						
	Muy Alta	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
	Alta	Tolerable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
	Media	Aceptable	Tolerable	Tolerable	Inaceptable	Inaceptable
	Baja	Aceptable	Aceptable	Tolerable	Tolerable	Inaceptable
	Muy Baja	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Tolerable
		Insignificante	Marginal	Moderada	Critica	Muy crítica
		Vulnerabilidad relativa				

- Nivel de riesgo aceptable (nivel de riesgo menor del 5%)

  Un escenario situado en esta región de la matriz, significa que la convolusión amenaza - vulnerabilidad no representa un peligro significativo, por lo que no amerita la inversión inmediata en acciones específicas para la gestión sobre el riesgo.

- Nivel de riesgo tolerable (nivel de riesgo entre el 15% y el 30%)

  Un escenario situado en esta región de la matriz, significa que aunque deben desarrollarse actividades para la gestión sobre el riesgo, esta tiene una prioridad de segundo nivel. Se deben ahondar los esfuerzos para disminuir la incertidumbre en la evaluación.

- Nivel de riesgo inaceptable (mayor al 30%)

  Un escenario situado en esta región de la matriz, significa que se requiere siempre desarrollar acciones prioritarias e inmediatas para su gestión debida al acto impacto que tendría sobre los elementos expuestos.

6.5.2. Resultados obtenidos

A continuación se presentan las tablas resumen de evaluación del riesgo desde el punto de vista holístico.

Tabla 6-47. Valoración del riesgo holístico para el sector 1

RIESGO INDIRECTO	AMENAZA PARA EL RIESGO DIRECTO					Alta	Inaceptable	Inaceptable
	VULNERABILIDAD FISICA					Crítica		
RIESGO DIRECTO	AMENAZA PARA EL RIESGO INDIRECTO					Media	Inaceptable	
	VULNERABILIDAD DEL CONTEXTO	URBANA	Restricciones de uso	Moderada	Crítica	Crítica		
			Accesibilidad	Muy crítica				
			Servicios Públicos	Muy crítica				
		SOCIAL	Población	Moderada	Crítica			
			Ingresos	Crítica				
			Ocupación	Muy crítica				
			Nivel de educación	Crítica				
			Atención en salud	Crítica				

Tabla 6-. Valoración del riesgo holístico para el sector 2

RIESGO INDIRECTO	AMENAZA PARA EL RIESGO DIRECTO					Alta	Inaceptable	Inaceptable
	VULNERABILIDAD FISICA					Crítica		
RIESGO DIRECTO	AMENAZA PARA EL RIESGO INDIRECTO					Media	Inaceptable	
	VULNERABILIDAD DEL CONTEXTO	URBANA	Restricciones de uso	Insignificante	Marginal	Crítica		
			Accesibilidad	Crítica				
			Servicios Públicos	Crítica				
		SOCIAL	Población	Moderada	Crítica			
			Ingresos	Crítica				
			Ocupación	Muy crítica				
			Nivel de educación	Moderada				
			Atención en salud	Crítica				

Tabla 6-48. Valoración del riesgo holístico para el sector 3

RIESGO HOLÍSITICO	**RIESGO INDIRECTO**	AMENAZA PARA EL RIESGO DIRECTO				Media	Inaceptable	Inaceptable
		VULNERABILIDAD FISICA				Crítica		
	RIESGO DIRECTO	AMENAZA PARA EL RIESGO INDIRECTO				Media	Inaceptable	
		VULNERABILIDAD DEL CONTEXTO	URBANA	Restricciones de uso	Marginal	Moderada	Crítica	
				Accesibilidad	Crítica			
				Servicios Públicos	Crítica			
			SOCIAL	Población	Moderada	Crítica		
				Ingresos	Crítica			
				Ocupación	Crítica			
				Nivel de educación	Moderada			
				Atención en salud	Crítica			

Tabla 6-49. Valoración del riesgo holístico para el sector 4

RIESGO HOLÍSITICO	RIESGO INDIRECTO	AMENAZA PARA EL RIESGO DIRECTO					Media	Inaceptable	Inaceptable
		VULNERABILIDAD FISICA					Critica		
	RIESGO DIRECTO	AMENAZA PARA EL RIESGO INDIRECTO					Media	Inaceptable	
		VULNERABILIDAD DEL CONTEXTO	URBANA	Restricciones de uso	Moderada	Moderada	Critica		
				Accesibilidad	Critica				
				Servicios Públicos	Critica				
			SOCIAL	Población	Moderada	Critica			
				Ingresos	Critica				
				Ocupación	Muy critica				
				Nivel de educación	Moderada				
				Atención en salud	Critica				

Como se puede ver en las tablas anteriores, el riesgo holístico en los cuatro sectores de estudio se considera INACEPTABLE, por lo que se deben implementar las medidas correctivas para la disminución de la amenaza (obras de mitigación) o la vulnerabilidad (reubicación de familias, mejoramiento integral del barrio, etc.). En el Plano GE108-PL-III-15 se presenta la categorización del amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo holístico para cada uno de los cuatro sectores de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

1. INTRODUCCIÓN 1

2. MARCO TEÓRICO 2

3. AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA 2

3.1. Introducción 2

3.2. Objetivo 5

3.3. Metodología 5
3.3.1. Variables aleatorias 5
3.3.2. Análisis probabilístico de estabilidad 6

3.4. Zonas homogéneas 9
3.4.1. Delimitación 9
3.4.2. Solicitaciones 10

3.5. Análisis probabilísticos 18
3.5.1. Factores intrínsecos 18

3.6. Resultados obtenidos 19
3.6.1. Subzonas IA y IB 19
3.6.2. Zonas IC y IIA 21
3.6.3. Subzonas IIB y IV 22
3.6.4. Zona III 23
3.6.5. Zona V 24
3.6.6. Zona VI 24

3.7. Zonificación por amenaza 25
3.7.1. Categorización 25
3.7.2. Descripción de las zonas de amenaza 26
3.7.3. Resumen de resultados 28

4. VULNERABILIDAD FÍSICA 31

4.1. Introducción 31

4.2. Objetivos 32

4.3. Metodología 32
4.3.1. Tipificación de las viviendas 32
4.3.2. Calificación de los daños 33
4.3.3. Matriz de daño 34

4.4. Categorización de la vulnerabilidad 35

5. RIESGO FÍSICO 38

5.1. Introducción 38

5.2. Metodología 38

5.3. Zonificación por riesgo físico 38

6. RIESGO HOLÍSTICO 41

6.1. Introducción 41

6.2. Metodología 41

6.3. Amenaza 44
6.3.1. Viviendas afectadas 44
6.3.2. Área afectada 45

6.4. Vulnerabilidad 46
6.4.1. Vulnerabilidad física 46
6.4.2. Vulnerabilidad del contexto 48

6.5. Riesgo 58
6.5.1. Matriz de aceptabilidad del riesgo 58
6.5.2. Resultados obtenidos 59

ANEXOS

Anexo I. Análisis de amenaza.

LISTADO DE PLANOS

Plano GE108-PL-III-01. Zonas homogéneas.
Plano GE108-PL-III-02. Secciones geotécnicas de análisis.
Plano GE108-PL-III-03. Solicitaciones por desplazamientos.
Plano GE108-PL-III-04. Solicitaciones por empujes laterales.
Plano GE108-PL-III-05. Solicitaciones por impactos.
Plano GE108-PL-III-06. Zonificación de amenaza por FMR.
Plano GE108-PL-III-07. Vulnerabilidad física por FRM.
Plano GE108-PL-III-08. Vulnerabilidad física por desplazamientos.
Plano GE108-PL-III-09. Vulnerabilidad física por caída de rocas.
Plano GE108-PL-III-10. Vulnerabilidad física por empujes.
Plano GE108-PL-III-11. Riesgo físico por FRM.
Plano GE108-PL-III-12. Riesgo físico por desplazamientos.
Plano GE108-PL-III-13. Riesgo físico por caída de rocas.
Plano GE108-PL-III-14. Riesgo físico por empujes.
Plano GE108-PL-III-15. Riesgo holístico por sectores.