

COLECCIÓN GUÍAS Y MANUALES

GUÍA METODOLÓGICA

PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD
Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

GUÍA METODOLÓGICA

PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD
Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

COLECCIÓN GUÍAS Y MANUALES

GUÍA METODOLÓGICA

PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD
Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

ESCALA DETALLADA

COLECCIÓN GUÍAS Y MANUALES



SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Oscar Eladio Paredes Zapata

DIRECTOR GENERAL

Marta Lucía Calvache Velasco

DIRECTORA DE GEOAMENAZAS

Gloria Lucía Ruiz Peña

COORDINADORA GRUPO

DE EVALUACIÓN DE AMENAZA

POR MOVIMIENTOS EN MASA

© Servicio Geológico Colombiano

ISBN: 978-958-99528-5-6

Primera reimpresión, junio de 2016

Autores

Guillermo Eduardo Ávila Álvarez

INGENIERO CIVIL, PhD

Carlos Eduardo Cubillos Peña

INGENIERO CIVIL, MSc

Alejandro Edilberto Granados Becerra

INGENIERO CIVIL, MSc

Enif Medina Bello

INGENIERO CIVIL, MSc

Édgar Alexander Rodríguez Castiblanco

INGENIERO GEÓLOGO, MSc

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

INGENIERO CIVIL, PhD, MSc

Gloria Lucía Ruiz Peña

INGENIERO CIVIL, Esp. GEOTECNIA, Esp., MSc

Imagen de carátula

Iglesia principal del municipio de Gramalote. Cuyo casco urbano fue destruido por un movimiento en masa en diciembre de 2010.

Archivo Grupo de Movimientos en Masa

Coordinación y revisión editorial

Luis Eduardo Vásquez Salamanca

PARTICIPACIÓN CIUDADANA

Y COMUNICACIONES

Diseño, diagramación e impresión

Imprenta Nacional de Colombia

Bogotá, D. C., Colombia

2016

CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Dirección Técnica

Servicio Geológico Colombiano

Gloria Lucía Ruiz Peña

SUPERVISORA DEL CONVENIO

Enif Medina Bello

(ABRIL 2014-DICIEMBRE 2014)

Yolanda Calderón Larrañaga

(SEPTIEMBRE 2013-ABRIL 2014)

Carlos Enrique Alvarado Flores

(SEPTIEMBRE 2013-NOVIEMBRE 2013)

Universidad Nacional de Colombia

Guillermo Eduardo Ávila Álvarez

DIRECTOR TÉCNICO

Édgar Alexander Rodríguez Castiblanco

COORDINADOR TÉCNICO

Asesores internacionales

Jordi Corominas Dulcet

GEÓLOGO, PhD

Sergio Mora Castro

INGENIERO GEÓLOGO, PhD, MSc

Colaboradores Técnicos

Juan Jacobo Pinilla Rodríguez

INGENIERO CIVIL, MSc

Mario Camilo Torres Suárez

INGENIERO CIVIL, PhD, MSc

Diana Marcela Patiño Bautista

TRABAJADORA SOCIAL

Víctor Niño Piña

INGENIERO CIVIL

César Augusto Alvarado Flores

ARQUITECTO

Apoyo Editorial

Victoria Eugenia Buitrón Paz

EDICIÓN

María Jaqueline Molina Ochoa

EDICIÓN

Diana Marcela Higuera

APOYO ADMINISTRATIVO



Agradecimientos

Como parte del proceso de preparación de esta guía se realizaron seis talleres, en los cuales se discutieron y socializaron diversos temas que permitieron llegar al enfoque metodológico que aquí se presenta. Agradecemos a todos aquellos que participaron activamente en la realización de los talleres y que representaron a las siguientes entidades:

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres
Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales
Universidad Pedagógica Nacional
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Pontificia Universidad Javeriana
Universidad de los andes
Universidad EAFIT
Universidad de Cartagena
Instituto Geográfico Agustín Codazzi–CIAF
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático
Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y Desarrollo Sostenible (Asocars)
Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
Corporación Autónoma Regional del Cauca
Corporación Nasa Kiwe
Fondo de Adaptación
Sociedad Colombiana de Geotecnia

Así mismo, queremos resaltar la colaboración activa de los conferencistas nacionales, quienes desde su experiencia aportaron al desarrollo y enfoque de los temas propuestos en los talleres:

ÁLVARO JAIME GONZÁLEZ GARCÍA, Sociedad Colombiana de Geotecnia
MARIO CAMILO TORRES SUÁREZ, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá
JUAN MARÍA MONTERO OLARTE, Sociedad Colombiana de Geotecnia
NELSON OBREGÓN NEIRA, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá
MARCO FIDEL GAMBOA RAMÍREZ, Universidad EAFIT
JUAN PABLO LONDOÑO LINARES, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales
PEDRO KARIN SERRATO ÁLVAREZ, Instituto Geográfico Agustín Codazzi–CIAF
CARLOS ALVARADO GONZÁLEZ, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
YOLANDA CALDERÓN LARRAÑAGA, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
DIANA MARÍA CUADROS CALDERÓN, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio

Agradecimiento especial al doctor Ómar Darío Cardona, por su disposición y valiosa orientación metodológica al proyecto, y al ingeniero Marco Tulio Herrera y su grupo de trabajo de la subdirección de Geografía y Cartografía del IGAC.

AUTORES



Contenido

Introducción.....	11
Capítulo uno	
Generalidades.....	13
1. Generalidades	15
1.1 Marco conceptual	15
1.1.1 Análisis del riesgo	15
1.1.1.1 Análisis de amenaza	15
1.1.1.2 Análisis de vulnerabilidad.....	16
1.1.1.3 Cálculo del riesgo	16
1.1.2 Evaluación del riesgo	16
1.1.2.1 Aceptabilidad y categorización del riesgo	16
1.1.2.2 Zonificación del riesgo.....	17
1.1.3 Mitigación y prevención del riesgo	17
1.2 Definiciones.....	17
1.3 Alcances de la guía	20
Capítulo dos	
Área de estudio e información básica	23
2. Área de estudio e información básica.....	25
2.1 Cartografía básica digital.....	26
2.1.1 Sistema de referencia.....	27
2.1.1.1 Exactitud posicional	27
2.2 Definición del tamaño de las unidades de trabajo y de zonificación	27
2.3 Modelo digital del terreno	28
2.3.1 Métodos directos.	28
2.3.2 Métodos indirectos.	28
2.4 Sensores remotos	29
Capítulo tres	
Análisis de amenaza	31
3. Análisis de amenaza	33
3.1 Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, escala 1:5000	34
3.1.1 Factores condicionantes.....	34
3.1.1.1 Geología para ingeniería	36
3.1.1.2 Geomorfología.....	41
3.1.1.3 Catálogo e inventario de movimientos en masa.....	42
3.1.1.4 Cobertura y uso del suelo	44
3.1.1.5 Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio.....	46

3.1.2	Modelo geológico-geotécnico.....	48
3.1.2.1.	Determinación de unidades geotécnicas homogéneas.....	48
3.1.3	Factores detonantes.....	49
3.1.3.1	Lluvia.....	49
3.1.3.2	Sismo.....	53
3.1.4	Zonificación básica de la amenaza.....	56
3.1.4.1	Cálculo de la amenaza en unidades de suelo.....	56
3.1.4.2	Criterios de clasificación de la amenaza.....	60
3.1.4.3	Zonificación y mapa de amenaza.....	60
3.2	Estudios de detalle de amenaza por movimientos en masa.....	60
3.2.1	Definir las zonas con condición de amenaza y riesgo.....	62
3.2.2	Definir unidades y secciones de análisis.....	62
3.2.3	Modelo geológico geotécnico para análisis detallados.....	63
3.2.4	Factores detonantes.....	63
3.2.4.1	Lluvia.....	63
3.2.4.2	Sismo.....	69
3.2.5	Escenarios de amenaza.....	69
3.2.6	Zonificación detallada de la amenaza.....	70
3.2.6.1	Cálculo de la probabilidad de falla.....	70
3.2.6.2	Probabilidad de falla y probabilidad de falla total.....	73
3.2.6.3	Criterios de clasificación de la amenaza en estudios detallados.....	76
3.2.6.4	Caracterización de la amenaza.....	76

Capítulo cuatro

Análisis de vulnerabilidad	83	
4.	Análisis de vulnerabilidad.....	85
4.1	Identificación y localización de los elementos expuestos.....	86
4.2	Caracterización de los elementos expuestos.....	89
4.3	Exposición.....	92
4.4	Fragilidad.....	94
4.4.1	Fragilidad de edificaciones.....	94
4.4.2	Fragilidad de líneas vitales.....	96
4.4.3	Fragilidad de personas.....	98
4.5	Escenarios de vulnerabilidad. Tipos de daño.....	98
4.5.1	Escenario de baja velocidad de deformación (movimientos lentos).....	99
4.5.1.1	Intensidad de deslizamientos lentos sobre las edificaciones.....	99
4.5.1.2	Intensidad de los deslizamientos en líneas vitales.....	101
4.5.2	Escenario de alta velocidad de deformación (movimientos rápidos).....	102
4.5.2.1	Intensidad de deslizamientos rápidos en edificaciones.....	102
4.5.2.2	Intensidad de deslizamientos rápidos en líneas vitales.....	103
4.5.3	Escenario de caída de rocas.....	104
4.5.3.1	Probabilidad de colisión.....	105
4.5.3.2	Definición del índice de daño (ID).....	106
4.5.3.3	Cálculo de la vulnerabilidad.....	106
4.6	Cálculo y zonificación de vulnerabilidad.....	106

Capítulo cinco	
Cálculo de riesgo	111
5. Cálculo del riesgo	113
5.1 Pérdidas económicas directas o indirectas. Cálculo del riesgo	114
Capítulo seis	
Evaluación de riesgo	117
6. Evaluación del riesgo	119
6.1 Categorización del riesgo	121
4.2 Medidas de intervención y categorías del riesgo	122
4.3 Riesgo alto mitigable o no mitigable	123
6.4 Zonificación del riesgo	125
Capítulo siete	
Recomendaciones	127
7. Recomendaciones	129
7.1 Presentación de resultados	129
7.2 Perfil de profesionales	131
Referencias	133
Anexos	141
Anexo A. Amenaza	143
Anexo B. Vulnerabilidad	152
Anexo B-3 Manual e instructivo de diligenciamiento para formatos de campo, diagnóstico estructural e inspección visual	158



Introducción

A

partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), los municipios del país deben hacer estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas de planificación del desarrollo seguro y gestión ambiental territorial sostenible.

En atención a lo anterior, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) suscribieron el Convenio Especial de Cooperación 020 de 2013, con base en el cual se desarrolla la presente guía metodológica. Cabe recordar que entre los objetivos misionales del SGC están la investigación, seguimiento y monitoreo de las amenazas geológicas para la gestión integral del riesgo, ordenamiento territorial y la planificación del territorio, con experiencia de más de 30 años en evaluación de amenaza por movimientos en masa a diferentes escalas y producción de información geocientífica durante cien años; por su parte, la UNAL tiene entre sus funciones misionales colaborar en el desarrollo socioeconómico del país mediante investigación científica y técnica, gracias a una experiencia acumulada de más de 20 años de trabajos e investigaciones en estabilidad de laderas y evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

En esta guía se describen los lineamientos metodológicos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local, que se podrán aplicar en la mayoría de las cabeceras municipales y centros poblados pequeños y medianos de Colombia; es decir, aquellos considerados dentro de las categorías 5 y 6, de acuerdo con las leyes 136 de 1994 y 1551 de 2012.

El proceso de la elaboración de esta guía incluyó las siguientes etapas básicas: la primera consistió en revisar juiciosamente referencias recientes y obligadas para establecer el estado del arte en evaluación de riesgos por movimientos en masa, y con base en ello se identificaron los métodos y procedimientos más convenientes para aplicarlos en el medio actual a la escala de detalle que se requiere, considerando la disponibilidad de información y viabilidad técnica y económica.

La segunda etapa correspondió a la discusión amplia y franca de los temas que se desarrollan en la guía, tanto en el grupo de trabajo interinstitucional (SGC y UNAL) como en reuniones y talleres en los que se contó con la participación de asesores externos nacionales e internacionales y con la presencia de representantes de entidades con experiencia investigativa académica y de gestión en materia de riesgos naturales. Como resultado de esta etapa se destaca el desarrollo discutido y consensuado de la guía, esencial para lograr legitimidad y aceptación por parte de quienes deben emplearla.

La tercera etapa del proceso consistió en la armonización de la guía con la normativa vigente, en particular con el proyecto del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio para incorporar la gestión de riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios, el cual finalmente se formalizó mediante el Decreto 1807 del 19 de septiembre de 2014 y con

la Resolución 1907 de 2013, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para incorporar la gestión del riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomca).

En esta guía se presentan con detalle los procesos metodológicos que se deben seguir para cumplir con la normatividad en lo relacionado con las etapas de evaluación del riesgo por movimientos en masa, de modo que su ejecución sea viable a partir de la información y las herramientas disponibles y que con ello se consigan condiciones básicas de calidad, rigurosidad y uniformidad en los estudios.

Debido a la complejidad implícita en las condiciones que determinan la estabilidad o inestabilidad de las laderas, donde entran en juego variables como el entorno geológico e hidrogeológico, el tipo de terreno, la pendiente, el agua, los sismos y los usos del terreno, no se puede desconocer la importancia del juicio de los expertos en los procesos de evaluación y análisis integral de riesgos. Sin embargo, en la guía se busca que ese juicio experto se pueda plasmar de la manera más objetiva posible, con el fin de reducir los márgenes de discrecionalidad en la valoración e interpretación de cada uno de los parámetros que se evalúan, para lo cual se plantean procedimientos metodológicos claros, basados en una muy buena cartografía temática –levantada al nivel de detalle que exige la escala de trabajo–, una exploración y caracterización del subsuelo acorde con la complejidad geológica y los problemas de inestabilidad identificados, el uso de la información hidrológica y sismológica disponible para los análisis de estabilidad, la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para los procesamientos y análisis cartográficos y el uso de herramientas numéricas para los cálculos de estabilidad y desplazamiento de los materiales.

Por otra parte, se busca que los resultados, plasmados en mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, representen de acuerdo con su nivel de calificación (alto, medio, bajo) significados similares, independiente del municipio estudiado o del consultor que realice el estudio, para lo cual es necesario plantear técnicas uniformes de evaluación, procesamiento y valoración de los datos.

En este documento se toman como base algunas guías internacionales, entre estas las normas australiana (AGS, 2007) y europea (JTC-1, 2008) y varios trabajos de tipo metodológico para la evaluación de riesgo por deslizamientos realizados en Colombia, entre los cuales se pueden mencionar los de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, DPAE (2000), Ingeocim Ltda. (2000), Ingeominas (2001), González (2005), JAM (2007) y Yamín et al. (2013).

Los resultados del estudio se relacionan en un documento metódico y conciso en el que se indican los datos requeridos, los pasos o procesos que se deben seguir en cada una de las etapas, los resultados que se obtienen y la forma como se deben presentar e interpretar los resultados. Además, se da a conocer parte de un capítulo dedicado al perfil de los profesionales necesarios para la ejecución o supervisión de tales estudios.

Finalmente, vale la pena señalar que en el Convenio SGC-UNAL se tiene prevista una segunda fase de validación y ajuste de la guía con base en un estudio piloto, con lo cual se espera poder identificar los aspectos positivos y negativos que aquí se plantean, tales como la viabilidad en el desarrollo de cada una de las etapas de evaluación y análisis y la utilización práctica del resultado final como herramienta de gestión, que sea comprendida y asimilada por los encargados de incorporar los estudios de riesgo en la elaboración o actualización de los planes de ordenamiento territorial.



GENERALIDADES

CAPÍTULO UNO

1. Generalidades

1.1 Marco conceptual

Como se ha presentado en la Ley 1523 de 2012, la gestión del riesgo es un proceso social que enmarca tres componentes principales: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres, cuyo fin es contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible. El proceso planteado en esta guía comprende tres grandes etapas: 1) análisis del riesgo, 2) evaluación del riesgo, y 3) mitigación y prevención del riesgo (figura 1-1). Cada una de ellas consta, a su vez, de una serie de elementos y procesos que, de acuerdo con el tipo de evaluación que se realice, pueden ser de mayor o menor grado de detalle y complejidad.

1.1.1 Análisis del riesgo

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012, el análisis del riesgo implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir, mediante la relación cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa de la amenaza y la vulnerabilidad, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales, y sus probabilidades. Como resultado de la etapa de análisis del riesgo, se obtiene una estimación de daños, costos asociados y pérdidas potenciales, que en el caso del presente documento se ha denominado el cálculo del riesgo. En esta etapa se incluye la aplicación de métodos y procesos para cuantificar el riesgo a partir de los escenarios de amenaza identificados y de las condiciones de vulnerabilidad que se relacionan con tales escenarios.

1.1.1.1 Análisis de amenaza

Esta etapa comprende tres fases principales: definir un modelo geológico-geotécnico, plantear escenarios de amenaza y zonificar la amenaza. Como resultado de estas fases y de la etapa de análisis en sí misma, se obtienen los mapas de amenaza.

La definición del modelo geológico-geotécnico incluye la consideración de los factores condicionantes de inestabilidad prevalentes en el área de estudio. Estos configuran la predisposición del terreno a la inestabilidad y están directamente relacionados con las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de las laderas, considerándose inherentes al área de estudio, dado que prácticamente no varían en el espacio o tiempo; debido a su compleja evaluación, los factores directamente relacionados con la intervención antrópica se incluyen como condicionantes, a pesar de que su variación espacio temporal puede ser frecuente. Como resultado de esta etapa se obtiene un mapa de zonas homogéneas desde el punto de vista de características y comportamiento esperado.

Factores como la lluvia y los sismos, que pueden modificar las condiciones de estabilidad de una ladera, se consideran detonantes y se deben evaluar en términos probabilísticos para la definición de escenarios de amenaza actuales y potenciales que determinarán las posteriores etapas de análisis de riesgo. La definición de escenarios permite caracterizar la amenaza en términos de ubicación, clasificación, material, tamaño, distancia de viaje, velocidad y frecuencia de ocurrencia, para integrarla con los escenarios de vulnerabilidad en la fase de análisis de vulnerabilidad.

Se propone la definición de las áreas de amenaza mediante la aplicación de métodos de equilibrio límite en términos de probabilidad de falla. Al final del proceso se tendrá un mapa de zonificación de amenaza que permitirá la toma de decisiones en un primer nivel de conocimiento, para la aplicación de las posteriores fases y etapas para la elaboración de estudios de riesgo. En el capítulo 3 se presenta la propuesta metodológica en forma detallada.

1.1.1.2 Análisis de vulnerabilidad

Este análisis comprende dos etapas fundamentales: la identificación de escenarios de vulnerabilidad y la zonificación de la vulnerabilidad. Los escenarios de vulnerabilidad se construyen con base en los escenarios de amenaza y consisten en la identificación de los tipos de daños esperados, para lo cual se consideran variables de entrada los elementos expuestos (bienes físicos y personas) y la fragilidad de tales elementos ante el tipo de amenaza definida en el escenario que se evalúa. Esta fragilidad depende de la tipología de la edificación, de las condiciones de exposición y de su resistencia ante las solicitaciones impuestas. Una vez que se tienen los escenarios se procede a realizar la zonificación de vulnerabilidad, mediante la construcción de mapas en los que se identifiquen las zonas de vulnerabilidad alta, media y baja. En el capítulo 4 se presenta la propuesta metodológica en detalle.

1.1.1.3 Cálculo del riesgo

El riesgo se evalúa para cada uno de los elementos expuestos como el producto de la amenaza por la vulnerabilidad y el valor o número de elementos. Este cálculo se presenta como un valor total de pérdidas probables por año en el caso de bienes físicos, y como un número probable de personas afectadas (muertas o heridas) por año. La propuesta de cálculo se presenta en el capítulo 5.

1.1.2 Evaluación del riesgo

Esta evaluación comprende, en primer lugar, la definición de criterios de seguridad, aceptabilidad y tolerancia del riesgo y, en segundo lugar, la zonificación del riesgo en mapas categorizados, para definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo.

1.1.2.1 Aceptabilidad y categorización del riesgo

Consiste en comparar los resultados de la etapa de análisis del riesgo con criterios de seguridad, aceptabilidad o tolerancia, con el fin de definir los niveles de riesgo alto, medio o bajo. Estos criterios de aceptabilidad pueden diferir en los ámbitos en que se evalúen y dependen de aspectos económicos, sociales y culturales, aunque es posible plantear indicadores que

faciliten su definición y permitan tener resultados comparables para los municipios, tales como la evaluación del riesgo en términos relativos, en los que se compara el valor de las pérdidas probables con el valor de los elementos expuestos.

Por otra parte, en la Ley 1523 de 2012 se expresa la necesidad de definir si el riesgo es mitigable o no, lo cual es una decisión que también depende de las condiciones particulares de cada municipio, pero aquí se plantea una propuesta para la toma de las decisiones también en términos relativos, en los que se comparan, por ejemplo, los costos de las alternativas de mitigación, incluyendo el reasentamiento de viviendas, y dependiendo de esto se define si es conveniente mitigar mediante obras o es mejor proceder a reasentamiento, caso en el cual en términos de la Ley 1523 se definiría como zona de riesgo alto no mitigable.

1.1.2.2 Zonificación del riesgo

Consiste en plasmar en mapas las zonas de riesgo, de acuerdo con los criterios antes definidos. Se definen las zonas de riesgo bajo, medio, alto y alto no mitigable. Cada una de estas zonas tiene implicaciones sobre las condiciones de uso y ordenamiento territorial, de acuerdo con lo definido en la Ley 1523. En las zonas de posible expansión que no tienen actualmente elementos expuestos, no se evalúa la condición de riesgo; esta corresponderá a quien realice los desarrollos urbanísticos futuros (podrán los desarrolladores emplear esta misma guía metodológica, considerando tanto el escenario de los procesos constructivos como el del terreno con las obras ya construidas). La propuesta metodológica para la definición de zonas de riesgo se presenta en el capítulo 6.

1.1.3 Mitigación y prevención del riesgo

En esta etapa se busca identificar las medidas requeridas para reducir los daños potenciales ante la probable ocurrencia de procesos de remoción en masa y comparar, mediante análisis de costo-beneficio, las medidas más convenientes para ser adoptadas. Es importante aclarar que no está dentro de los alcances de la presente guía definir las medidas de mitigación y prevención del riesgo, puesto que son el resultado específico de cada uno de los estudios de riesgo que se realicen.

1.2 Definiciones

A continuación se presentan las definiciones relacionadas con el marco conceptual sobre el que se basa la guía metodológica para evaluación de riesgo por movimientos en masa. Varias de estas definiciones son presentadas en la adopción de la Ley 1523 de 2012 y han sido complementadas de acuerdo con su aceptación y uso frecuente en la gestión del riesgo por movimientos en masa a nivel internacional (AGS, 2007; Fell et al., 2005; UNDRO, 1979; PNUD/UNDRO, 1991; PMA: GCA, 2007, entre otros). Por conveniencia de consulta son presentadas en orden alfabético.

Amenaza: Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios

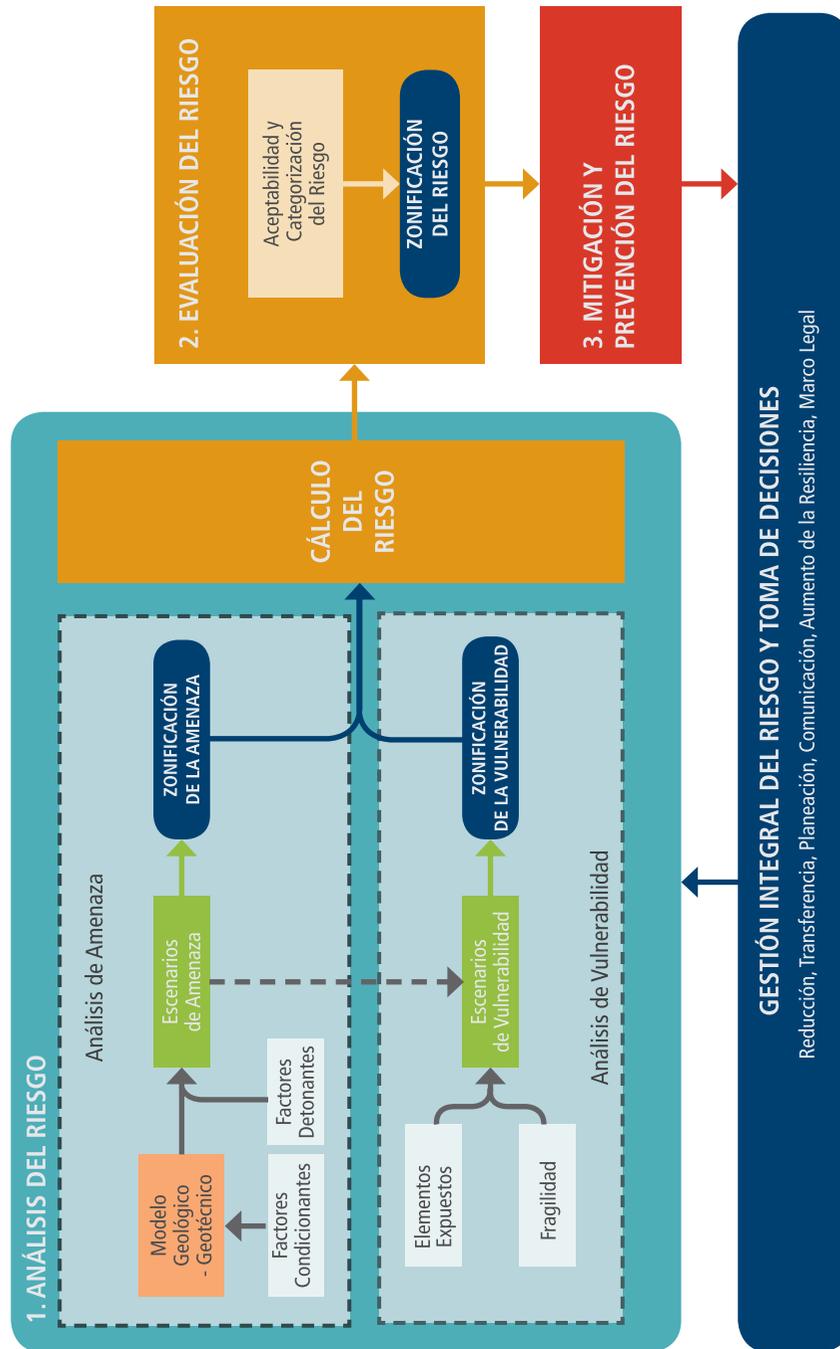


Figura 1-1. Marco de referencia para evaluación de riesgo por movimientos en masa y la toma de decisiones.

y los recursos ambientales. La caracterización de la amenaza debe incluir su ubicación, clasificación, magnitud o intensidad, y se evalúa en función de probabilidad de ocurrencia espacial y temporal. La magnitud o intensidad de la amenaza se pueden expresar en términos de volumen, área, velocidad, intensidad o energía.

Elementos expuestos: Se refiere a las personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.

Fragilidad: Nivel de daño que un elemento dado puede sufrir luego de estar sometido a la acción de un movimiento en masa. Para bienes materiales, este nivel de daño está relacionado con el valor de las pérdidas relativo al valor de la propiedad; para personas, el nivel de daño se relaciona con la pérdida de vidas humanas y las lesiones físicas sufridas producto de un evento.

Intervención correctiva: Proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación.

Intervención prospectiva: Proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevas situaciones de riesgo por medio de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos ante posibles eventos peligrosos. Su objetivo último es evitar nuevo riesgo y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro.

Mitigación del riesgo: Aplicación selectiva de medidas apropiadas y principios de manejo para reducir la posibilidad de la ocurrencia de un evento o de sus consecuencias desfavorables. Dichas medidas de intervención prospectiva o correctiva están dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada, cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza cuando sea posible y la vulnerabilidad existente.

Movimiento en masa: Equivale a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas. La terminología y clasificación de movimientos en masa para este documento es conforme a la *Guía para la evaluación de amenazas por movimientos en masa* propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA), adoptada por Colombia (PMA: GCA, 2007), en la que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad.

Riesgo: Medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, salud, propiedad o el ambiente. Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socionatural, o antrópico no intencional, en un periodo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. Según la manera como se defina el elemento en riesgo, el riesgo puede medirse según la pérdida económica esperada, según el número de vidas perdidas o según la extensión del daño físico a la propiedad.

Riesgo específico: Cálculo de pérdidas de cualquier tipo que se expresan como proporción del riesgo total. Este cálculo está definido en un periodo de referencia, una región y para una amenaza particular. El riesgo específico también se usa para definir las pérdidas

financieras a la propiedad, en cuyo caso se refiere generalmente al coeficiente del costo de reparación o reinstauración de la propiedad, según el costo de remplazo total.

Vulnerabilidad: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

1.3 Alcances de la guía

En esta guía se presentan los procedimientos que a la luz del estado actual del conocimiento y de las capacidades técnicas y económicas del país resultan convenientes para la ejecución de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo a escalas detalladas, siguiendo la normatividad presentada en el Decreto 1807 de 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa en suelos urbanos, de expansión urbana y centros poblados rurales, para la revisión o expedición de planes de ordenamiento territorial).

No obstante que lo planteado en esta guía busca reducir los márgenes de subjetividad mediante evaluaciones objetivas de las variables y el uso de procedimientos basados en conceptos físicos, la complejidad que involucra la estabilidad de las laderas y su interacción con las realidades sociales, culturales y económicas de las personas que en ellas habitan o desarrollan actividades, hace que los estudios de riesgo involucren necesariamente un cierto margen de incertidumbre que es casi imposible de eliminar. Además, las condiciones de riesgo no son constantes en el tiempo, por lo cual los estudios requieren actualizaciones periódicas que dependen de los cambios naturales o urbanísticos que experimenten los municipios.

La metodología de evaluación de riesgo que aquí se plantea se limita exclusivamente a riesgos por movimientos en masa, es decir, se excluyen los procesos metodológicos para evaluación de riesgos por inundaciones o avenidas torrenciales. La metodología propuesta para la evaluación de la amenaza es de tipo cuantitativo, considerando análisis probabilísticos. En relación con la vulnerabilidad, las metodologías planteadas se refieren fundamentalmente a la vulnerabilidad física de los elementos expuestos. La valoración del riesgo se hace en función de las pérdidas anuales esperadas, separando las pérdidas de vidas humanas y las pérdidas económicas.

Finalmente, la definición respecto a la condición de riesgo mitigable o no mitigable se presenta en función de un análisis de costo-beneficio al comparar las alternativas de no intervención, adoptar acciones de mitigación directa o realizar reasentamiento de viviendas. No está entre los objetivos de esta guía definir los tipos y características de las medidas de mitigación y prevención del riesgo que se deben adoptar en cada caso.

De conformidad con las disposiciones contenidas en el Decreto 1807 de 2014, del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, para la revisión de los contenidos a mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de nuevos planes, los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa deben efectuarse según el principio de gradualidad de que trata la Ley 1523 de 2012, de acuerdo con dos

escalas de trabajo y condiciones técnicas específicas en los denominados estudios básicos a escala 1:5000 y estudios detallados a escala 1:2000.

La elaboración de estudios básicos (1:5000) permite la definición de zonas con condición de amenaza y zonas con condición de riesgo de acuerdo con el esquema metodológico presentado en la figura 1-2, en las cuales será necesario realizar estudios detallados a escala 1:2000.

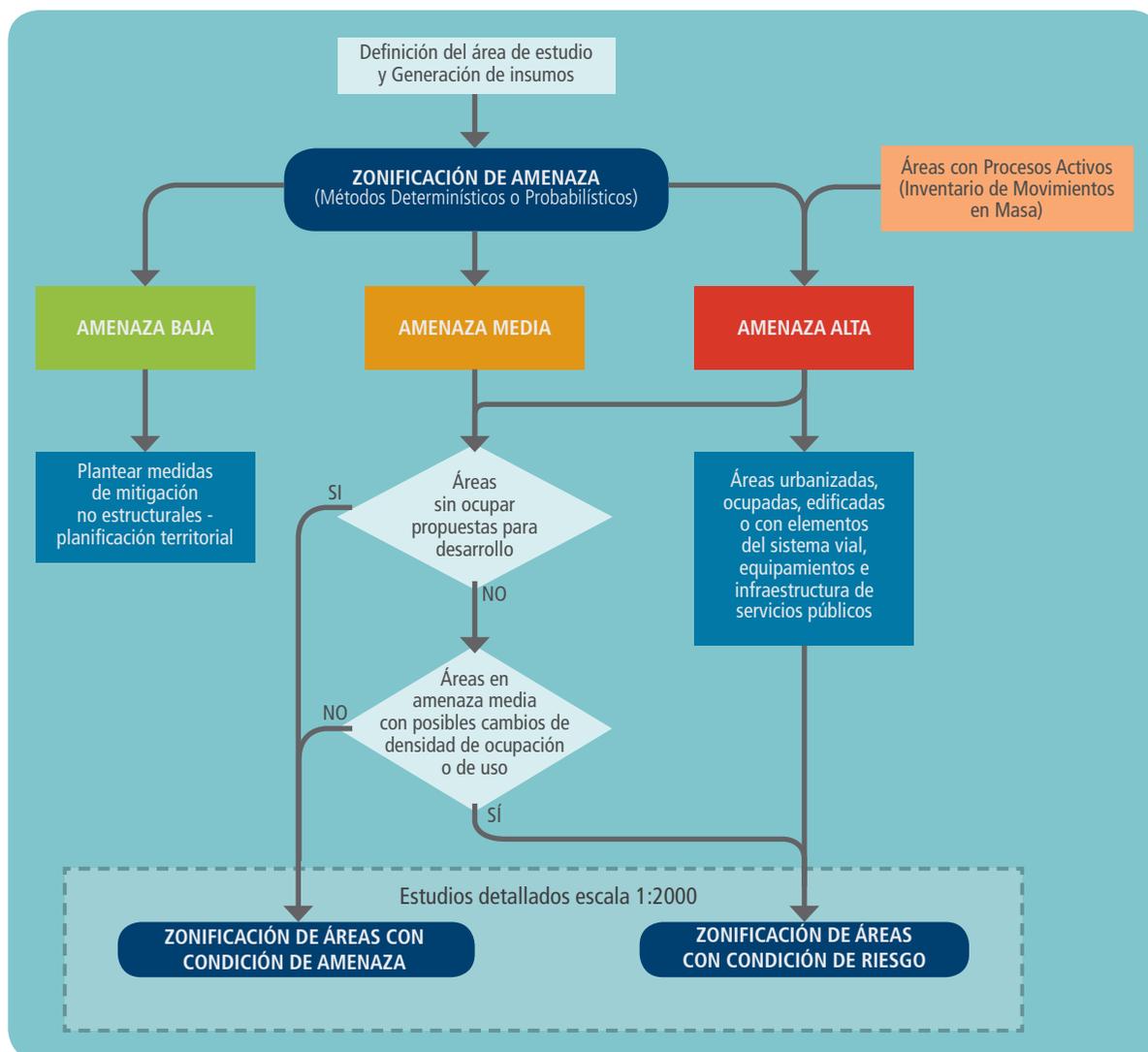


Figura 1-2. Esquema metodológico para la elaboración de estudios básicos de amenaza y definición de zonas para la elaboración de estudios detallados.

Fuente: Decreto 1807 de 2014.

La elaboración de los estudios detallados comprende las etapas que se presentan en el siguiente esquema metodológico (figura 1-3). En los siguientes numerales de la guía se presenta el proceso metodológico propuesto para la elaboración de estudios básicos y detallados.

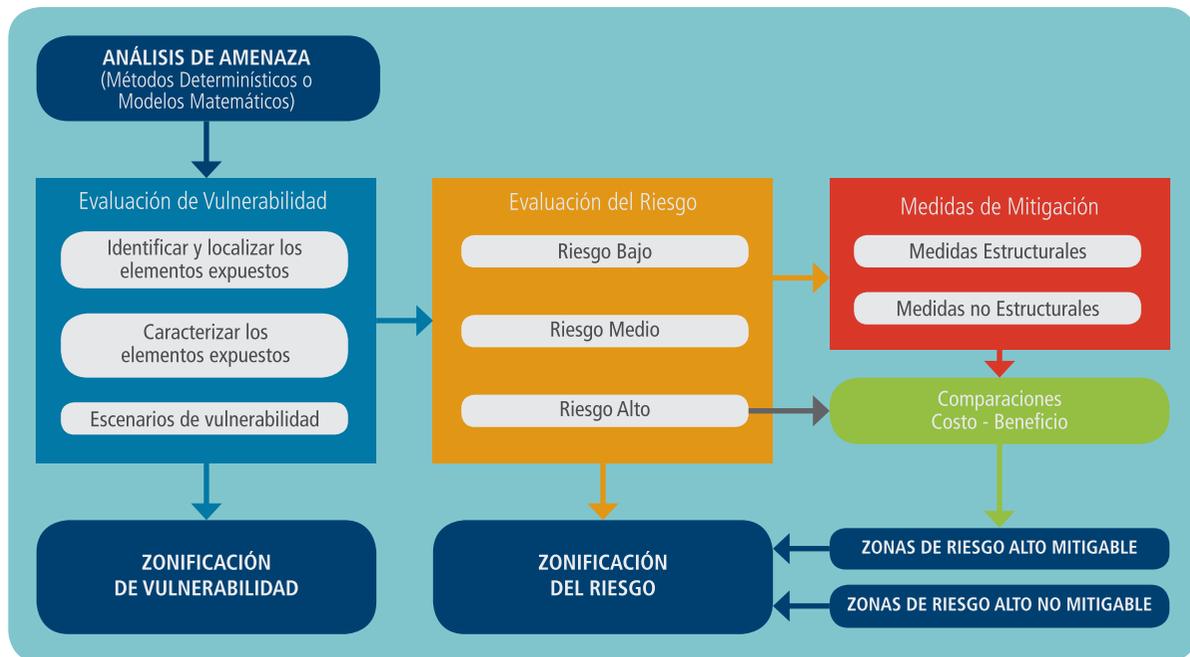


Figura 1-3. Esquema metodológico para la elaboración de estudios detallados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

Fuente: Decreto 1807 de 2014.



ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN BÁSICA

CAPÍTULO DOS

2. Área de estudio e información básica

Con base en los requerimientos técnicos presentados en el Decreto 1807 de 2014, para la elaboración de los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo a escalas 1:5000 y 1:2000, se plantean algunas consideraciones para la definición del área de estudio y los insumos básicos tanto cartográficos como digitales (por ejemplo, Modelo Digital del Terreno, MDT), necesarios para la elaboración de tales estudios.

Los estudios básicos de amenaza por movimientos en masa a escala 1:5000 se deben realizar en zona urbana, suburbana, periurbana, de expansión y centros poblados, según lo definido por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), la Secretaría u Oficina de Planeación municipal y la de gestión del riesgo de la alcaldía municipal, de tal modo que respondan a la necesidad de gestión del municipio en aquellas zonas identificadas como de presión urbanística. Deben tenerse en cuenta las áreas de relieve escarpado, montañoso y ondulado, con pendientes iguales o superiores a cinco grados, más los taludes marginales de cauces, así como las zonas planas que puedan recibir los efectos de los movimientos en masa. Adicionalmente, se deben considerar aquellas zonas urbanas y de expansión urbana que, con una pendiente inferior a cinco grados hayan presentado problemas de inestabilidad y subsidencia debido a problemas geotécnicos o al desarrollo de actividades antrópicas.

Las áreas con condición de riesgo se identificarán a partir del análisis de las áreas zonificadas como de amenaza alta en los estudios básicos, con la información cartográfica disponible (predial o catastral, entre otras) que permita identificar la existencia de elementos expuestos, de áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como de aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales. Con esta información se elabora el mapa con la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo y se establecen los criterios para la caracterización y delimitación de las unidades de análisis que dependen del fenómeno a estudiar y la priorización para la realización de los estudios detallados a escala 1:2000 que permitirán categorizar el riesgo.

Las zonas de amenaza media para las cuales en la revisión o expedición de un nuevo POT se proponga el cambio de densidad o un cambio en los usos del suelo que pueda generar o incrementar el riesgo en la zona se consideran como áreas en condición de riesgo.

Dado que las áreas con condiciones de riesgo y amenaza definidas a partir de los estudios básicos se deben analizar en estudios detallados a escala 1:2000, cuyo alcance conlleva la aplicación de modelos determinísticos o matemáticos para la evaluación de amenaza en secciones de análisis en ladera, además de la evaluación de vulnerabilidad y riesgo considerando una identificación, localización y caracterización de los elementos expuestos, es necesario contar con información básica que permita tanto la definición de características topográficas particulares como la identificación de todos los elementos expuestos en tér-

minos catastrales, geográficos, geométricos, para las cuantificaciones de daños y pérdidas potenciales. Este tipo de información se puede obtener a partir de levantamientos topográficos detallados, modelos digitales del terreno y productos de sensores remotos de adecuada resolución espacial y temporal.

A continuación se presentan brevemente algunas recomendaciones y sugerencias relacionadas con la generación de cartografía base y escalas de trabajo; estos lineamientos deben tomarse como guía.

2.1 Cartografía básica digital

Para realizar los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa que favorezcan el uso de SIG, es indispensable disponer de la cartografía básica en formato digital, preferiblemente obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

En el caso de no contar con esta cartografía ni con el respectivo MDT, se sugiere la toma de fotografías aéreas para fotorrestitución y la generación de la cartografía que contenga los elementos básicos de la cartografía a dicha escala, según especificaciones técnicas definidas por el IGAC. Estas fotografías aéreas pueden usarse también para establecer las condiciones urbanísticas actualizadas y para hacer el levantamiento de cartografía temática (geología, geomorfología, entre otros).

Si el municipio cuenta en su área urbana con cartografía básica 1:5000, se elaborará la zonificación de amenazas por movimientos en masa a esta escala. En aquellos sitios clasificados con condición de amenaza que estén urbanizados, ocupados o edificados o en los que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos, se evaluará la condición de riesgo a escala 1:2000 y se deberá disponer de perfiles topográficos detallados en los cuales se identifiquen características físicas propias en la evaluación de estabilidad de taludes como modelo geológico-geotécnico, agrietamientos, escalonamientos, agua superficial, entre otros.

El tamaño de los mapas para presentación tanto a escala 1:5000 como 1:2000 será de 75 x 50 cm, de acuerdo con las dimensiones de las planchas disponibles en el IGAC.

A continuación se referencian algunas normas técnicas colombianas relacionadas con la obtención de la cartografía básica:

- NTC 5204: 2003. Precisión de Redes Geodésicas
- NTC 5205: 2003. Precisión de Datos Espaciales
- NTC 4611: 2011. Información Geográfica. Metadato Geográfico
- NTC 5043: 2010. Información Geográfica. Conceptos Básicos de la Calidad de los Datos Geográficos
- NTC 5660: 2010. Información Geográfica. Evaluación de la Calidad Procesos y Medidas.
- NTC 5661: 2010. Información Geográfica, Método para Catalogación de Objetos Geográficos
- NTC 5662: 2010. Información Geográfica. Especificaciones Técnicas de Productos Geográficos
- NTC 5798: 2011. Información Geográfica. Referencia Espacial por Coordenadas

2.1.1 Sistema de referencia

Los resultados cartográficos que se obtengan o produzcan deberán estar referidos al sistema de coordenadas Magna Sirgas, siguiendo los lineamientos del documento IGAC (2004).

Los mapas se presentarán en un sistema de proyección cartesiana (N, E). El plano de proyección se definirá de acuerdo con el origen cartográfico que corresponda al área de estudio, según la regionalización de los parámetros de transformación del IGAC.

2.1.1.1 Exactitud posicional

Los valores de precisión en posición en tres dimensiones de la cartografía oficial a escala 1:2000 se aceptarán con un Error Medio Cuadrático (EMC) menor de 60 cm para todos los productos. Solo en el 10 % de los casos se aceptará que la posición de los vectores en el mapa, comparados con los de terreno, exceda el valor de EMC. Debe garantizarse además la calidad integral de la cartografía fotogramétrica básica a escala 1:2000.

2.2 Definición del tamaño de las unidades de trabajo y de zonificación

Cuando se trabaja con información espacial, la representación cartográfica requiere dos conceptos básicos: la ubicación en el espacio de los objetos y sus datos o las características temáticas en sí mismas que lo definen (atributos). La información espacial y la información temática asociada configuran la base para aplicar los SIG.

Las operaciones en SIG para la zonificación de amenaza por movimientos en masa requieren la definición de una unidad de cálculo adecuada o tamaño de la celda (pixel). Esta unidad de cálculo del terreno (UCT) corresponde al dominio referido al territorio con base en el cual se define, calibra y valida un modelo. La definición de su tamaño apropiado depende de la escala de análisis. El área mínima de una UCT, para propósitos de operaciones en un SIG a una escala dada, está relacionada con la resolución espacial de la cartografía y mapas; es decir, la medida del área identificable más pequeña como una unidad separada discreta.

Se debe definir también la unidad de zonificación del terreno (UZT) como la unidad de discretización para producir mapas temáticos con propósitos de zonificación. La UZT no necesariamente debe tener la misma discretización del territorio apropiada para mapas de zonificación; esta última puede contener múltiples UCT. El área mínima de una UZT está relacionada con la resolución de la información de la zonificación que se desee (Calvello et al., 2013).

Comúnmente, con propósito de cálculo, se define la UCT como una unidad cuadrada. La dimensión del tamaño de esta celda está dada por un factor de escala de 1:1000, siendo entonces siempre el mismo tamaño de celda cuadrada en el papel, de 1 x 1 mm. Sin embargo, este tamaño no es apropiado al definirse unidades de zonificación en los mapas. Por lo anterior, de acuerdo con la experiencia del Servicio Geológico Colombiano en la elaboración de cartografía temática de geología y de geomorfología, se sugiere que el tamaño de la UZT mínima cartografiable sea de 400 m² en mapas a escala 1:2000 y de 2500 m² en mapas a escala 1:5000, que correspondería a polígonos aproximados en el papel de 1 x 1 cm.

Las UZT mínimas cartografiables aplican para las coberturas temáticas; sin embargo, los deslizamientos que tengan áreas más pequeñas que las mínimas cartografiables deberán representarse en lo posible como polígonos o, en todo caso, por lo menos por un punto (Calvello et al., 2013). A continuación se relacionan las dimensiones de la UCT adecuadas para las escalas 1:2000 y 1:5000 (tabla 2-1).

Tabla 2-1. Dimensiones de las Unidades de Cálculo del Terreno

Escala de referencia	Dimensiones del pixel elemental - UCT	
	Longitud (m)	Área (m ²)
1:X	X/1000	X ² /10 ⁶
1:2000	2	4
1:5000	5	25

Fuente: Calvello et al., 2013.

Para realizar la zonificación de amenazas y construir la cartografía temática relacionada con las escalas 1:2000 y 1:5000 se requieren algunos insumos básicos, tanto de información primaria como secundaria. Entre los más importantes se encuentran la cartografía básica IGAC a escala 1:2000 o 1:5000, el respectivo MDT (con resolución de 2 o 5 m, respectivamente) y fotografías aéreas con resoluciones mayores de 10 m.

2.3 Modelo digital del terreno

El MDT representa la forma del terreno una vez removidos todos los elementos ajenos a este, como la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno. Los MDT se realizan usando una amplia variedad de fuentes de datos y mediante la utilización de técnicas especializadas, así como el empleo de soluciones tecnológicas. Información detallada sobre la definición generación y usos del MDT se puede consultar en Felicísimo (1992, 1994).

Los métodos para la generación de los modelos digitales de elevación se pueden dividir en dos grupos:

2.3.1 Métodos directos

Se obtienen a partir de mediciones directas sobre el terreno real, como son:

- Levantamientos topográficos con estación total o con GPS.
- Altimetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o láser.

2.3.2 Métodos indirectos

Se utilizan archivos digitales elaborados previamente, como los siguientes:

- Curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión automática.

- Restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (procesos fotogramétricos).

2.4 Sensores remotos

La utilidad de los sensores remotos en la zonificación de riesgo por movimientos en masa es transversal al desarrollo de todas las etapas de análisis: amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Actualmente, se dispone de un gran número de documentos técnicos y académicos relacionados con el uso de sensores remotos en los levantamientos temáticos, por lo que basados en la escala de trabajo se puede recomendar la obtención de información con resolución espacial mayor de 15 metros, con sensores como los que se relacionan en la tabla 2-2.

Tabla 2-2. Relación de algunos sensores remotos y su resolución espacial de detalle

SENSOR	RESOLUCIÓN ESPACIAL MULTIESPECTRAL (m)	RESOLUCIÓN ESPACIAL PANCRÓMÁTICA (m)
Aster	15	
Landsat 6		15
Landsat 7		15
Fotografías aéreas	15 , 10 , 5 , 2	15 , 10 , 5 , 2
Spot 4	10	
Spot 5		5 o 2,5
Ikonos	3,2	0,82
Quickbird	2,44	0,61
RapidEye	5	
Worldview 1		0,5
Worldview 2	2	0,5
GeoEye 1	1,64	0,41
Eros A		1,9
Eros B		0,7
Fasat Charlie	5,8	1,45
Kompsat 2	4,0	1,0
Kompsat 3	2,8	0,7



ANÁLISIS DE AMENAZA

CAPÍTULO TRES

3. Análisis de amenaza

En este capítulo se describen los aspectos metodológicos propuestos para elaborar la zonificación de amenaza por movimientos en masa, según lo dispuesto en el Decreto 1807 de 2014. La zonificación de amenaza en los estudios básicos se realiza a escala 1:5000 con base en análisis determinísticos, mientras que para los estudios de detalle se realiza a escala 1:2000, aplicando análisis probabilísticos.

Para efectuar los estudios de amenaza se requiere la cartografía básica del área de análisis a escala 1:5000 y a partir de ella se genera la cartografía temática, correspondiente a cartografía geológica en unidades de geología para ingeniería, la cartografía geomorfológica en cuanto a elementos geomorfológicos y la cartografía de cobertura y uso del suelo. Además, se debe hacer un inventario de movimientos en masa y un registro histórico de estos (catálogo).

Tanto el catálogo como el inventario de los movimientos en masa permiten identificar las características de los eventos, su distribución espacial y temporal y su relación con los factores detonantes. La intervención antrópica se considera en los análisis a partir de la información de cobertura y uso del suelo y de los mismos levantamientos de cartografía básica, donde deben quedar identificados los cortes de terreno, taludes, rellenos y demás accidentes del terreno que intervienen en la estabilidad.

A partir de los temas descritos se establece un modelo geológico-geotécnico en el que se requiere, como actividad adicional, efectuar una exploración geotécnica básica que permita caracterizar geomecánicamente los materiales del subsuelo y efectuar un análisis determinístico de estabilidad, que para el caso de taludes en suelos se hace por medio de un modelo de talud infinito y para el caso de taludes en roca, mediante modelos convencionales de estabilidad de macizos rocosos, según lo establezca el experto.

Para el primer caso se cuenta, entonces, con una distribución espacial de los espesores de suelo y de sus características mecánicas, además de una posición del nivel freático y de una aceleración sísmica, con lo cual se procede a calcular, por métodos de equilibrio límite, los factores de seguridad en diferentes celdas o “columnas” de suelo, para hallar así su distribución espacial. Con este procedimiento, el factor de seguridad es el dato discriminante para establecer las categorías de amenaza. Para taludes en roca, la zonificación de amenaza se basa en el método SMR (Romana, 1985), que tiene en cuenta las características geométricas del talud, las características estructurales del macizo y las propiedades mecánicas de las rocas.

Las áreas de amenaza alta definidas en los estudios básicos en los que se identifiquen elementos expuestos, áreas urbanizadas ocupadas o edificadas, así como aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales, se consideran áreas en condición de riesgo y se priorizan para llevar a cabo estudios detallados. Por su parte, las zonas des-

ocupadas categorizadas como de amenazas media y alta, y clasificadas como suelo urbano, de expansión urbana o centro poblado rural, se consideran zonas con condición de amenaza y también se deben evaluar en estudios detallados.

La cartografía relacionada con los temas de geología para ingeniería y elementos geomorfológicos en los estudios de zonificación de amenaza por movimientos en masa detallados es la misma que la generada en los estudios básicos, pero con un énfasis especial en la elaboración de columnas estratigráficas que permitan a partir de un modelo geológico-geotécnico y perfiles de análisis para unidades de ladera (definidos por el experto en aquellos sectores clasificados con condición de amenaza o riesgo), calcular la probabilidad de falla para deslizamientos superficiales, profundos o caídas de roca según corresponda. Este tipo de análisis permite considerar la incertidumbre en los parámetros de resistencia del terreno y la probabilidad de ocurrencia de los factores detonantes, es decir, la ejecución de análisis de estabilidad probabilísticos.

La zonificación de la amenaza obtenida en los estudios de detalle debe contener, además de la probabilidad de falla de los taludes, la caracterización del proceso amenazante en materia de ubicación, clasificación del tipo de movimiento, material, magnitud, distancia de viaje, velocidad e intensidad, datos básicos para llevar a cabo los análisis cuantitativos de vulnerabilidad y riesgo.

3.1 Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, escala 1:5000

Para la elaboración de los estudios básicos, el Decreto 1807 de 2014 define el “Área de Estudio”, la cual se describe en esta guía en el capítulo 2; los “insumos” en términos de cartografía base y de inventario de procesos morfodinámicos. Por el proceso metodológico que se plantea en esta guía, tales insumos forman parte de los factores condicionantes de la amenaza. Finalmente, el decreto define el “Alcance” del análisis de amenaza en lo relacionado con la integración de las variables que inciden en la ocurrencia, tanto actual como futura de los procesos de inestabilidad, considerando como agentes detonantes el agua, el sismo y los factores antrópicos, y plantea que como mínimo se debe hacer alguno de los siguientes tipos de análisis: estadísticos, determinísticos o probabilísticos.

En esta guía se consideran los agentes detonantes agua y sismo, mientras que los factores antrópicos se incluyen en forma implícita o condicionante en la topografía y en la cobertura y uso del suelo. En cuanto a los métodos de análisis, se considera que el más apropiado es el determinístico, teniendo en cuenta el tamaño relativamente pequeño de los municipios que se van a zonificar, y ese es el método que se describe en esta guía para la escala 1:5000.

En la figura 3-1 se presenta un diagrama conceptual de las actividades que se deben efectuar para zonificar la amenaza.

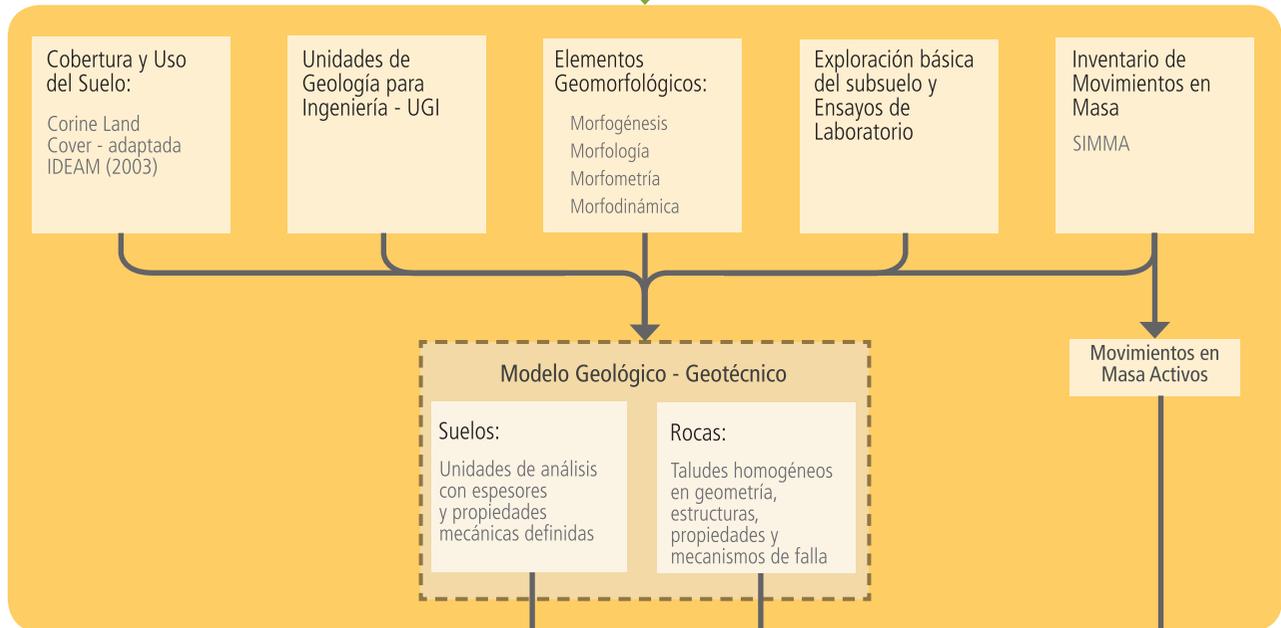
3.1.1 Factores condicionantes

Estos factores comprenden geología para ingeniería, geomorfología de elementos geomorfológicos y cobertura y uso del suelo. Para elaborar la zonificación se debe contar con la cartografía básica, el modelo digital del terreno y los sensores remotos (fotografías aéreas, ortofotos, imágenes de satélite, entre otros) disponibles, todos a la escala adecuada, según las características descritas en el capítulo 2.

INSUMOS



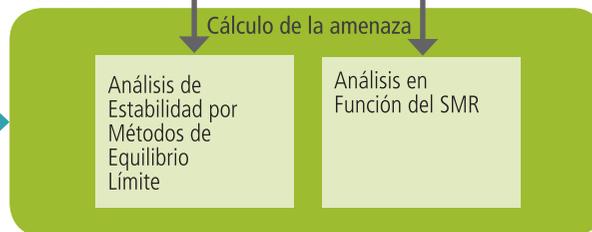
FACTORES CONDICIONANTES



FACTORES DETONANTES



MODELACIÓN



RESULTADOS

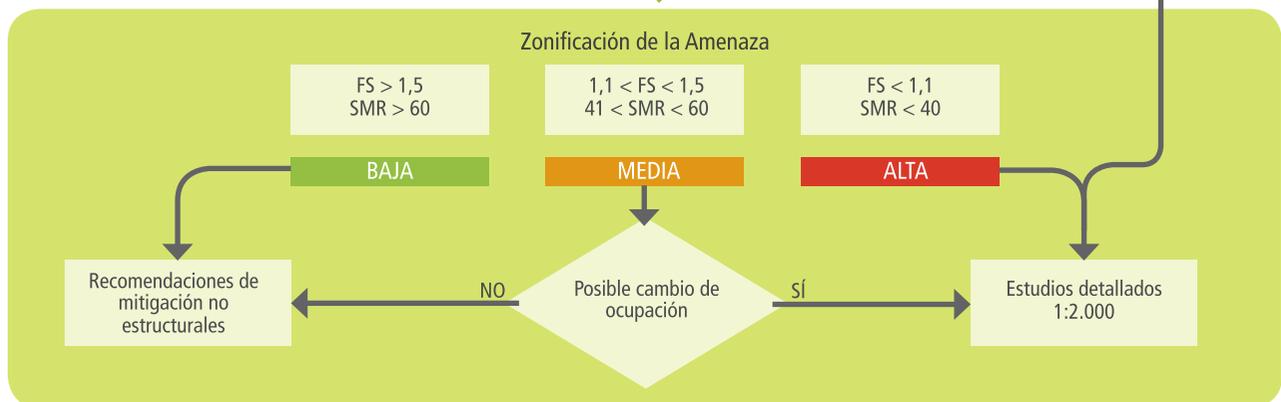


Figura 3-1. Zonificación básica de amenaza por movimientos en masa a escala 1:5000.

3.1.1.1 Geología para ingeniería

De acuerdo con la guía metodológica para elaboración de mapas de geología para ingeniería del Servicio Geológico Colombiano “un mapa de geología para ingeniería es un tipo de mapa geológico que muestra información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y los suelos, el agua subterránea, las características del relieve y los procesos geodinámicos actuales, que son considerados los componentes básicos del ambiente geológico, de suma importancia en estudios de geología aplicada a la ingeniería” (documento en preparación).

Los mapas de geología para ingeniería se pueden elaborar a partir de las Unidades de Geología para Ingeniería (UGI), que son el insumo más importante desde el punto de vista de homogeneización de las características ingenieriles de los materiales del área de estudio. Las UGI permiten diferenciar tres aspectos fundamentales para obtener los modelos que permitan realizar los análisis de estabilidad: 1) diferenciar los materiales aflorantes entre suelos y rocas, 2) definir los espesores de suelo o las características estructurales del macizo rocoso, y 3) caracterizar los materiales de acuerdo con sus propiedades mecánicas.

Las etapas básicas generales para la generación de esta cartografía son la recopilación de información secundaria relacionada, la definición del marco geológico y estructural regional, la delimitación y caracterización de las unidades, así como la elaboración del mapa a partir de la cartografía básica, el modelo digital de elevación y los sensores remotos.

Es importante hacer una completa recopilación de información secundaria relacionada que contemple la cartografía geológica existente en entidades como el SGC, universidades, corporaciones autónomas regionales, alcaldías municipales, entre otras, con el propósito de establecer, para el casco urbano y los alrededores, un ambiente geológico, y describir un marco geológico y estructural de manera regional.

En cuanto a información más detallada, se debe indagar en las alcaldías, empresas privadas, curadurías urbanas, universidades, etc., sobre la existencia de información geotécnica en el área de estudio o en zonas aledañas; esto permitirá contar con más información para definir las etapas de exploración del subsuelo que se describen posteriormente, las cuales apoyarán los procesos de zonificación de UGI.

Unidades de Geología para Ingeniería (UGI)

Las UGI referidas en esta guía corresponden a zonas delimitadas teniendo en cuenta que representen alto grado de homogeneidad con respecto a las propiedades geotécnicas básicas, cumpliendo con las características de área y espesores mínimos cartografiables, de acuerdo con la escala de trabajo y con base en la definición de unidades litoestratigráficas. Se clasifican como rocas o suelos a partir de cuatro grandes grupos:

- Rocas.
- Suelos residuales y saprolitos.
- Suelos transportados en cualquier ambiente (depósitos aluviales, de ladera o coluviales, costeros, volcánicos, eólicos y glaciares).
- Suelos antrópicos.

Como base para la generación de las UGI, se propone clasificar los materiales de acuerdo con su origen (tabla 3-1), donde se modificó a partir de las unidades geológicas superficiales propuestas por Hermelín (1985) y Salazar (1995).

Tabla 3-1. Unidades Geológicas de Ingeniería según su origen

ORIGEN DE LA UGI	TIPO DE UGI
Derivadas de roca <i>In situ</i>	Roca inalterada Saprolito Suelo residual
Depósitos aluviales	Aluviones recientes o de lecho de río Llanuras aluviales Abanicos o conos aluviales Terrazas aluviales Depósitos fluviotorrenciales
Depósitos lacustres y paludales	Planicie lacustrina, artesa lagunar, plano anegadizo
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	Coluviones Talus Flujos (de lodo, tierra y de escombros) Derrubios de pendiente
Depósitos costeros	Deltas, barras, playas, etc.
Depósitos volcánicos	Tefras Surges Flujos de piroclastos Ignimbritas Flujos de lodos volcánicos Lahares Cenizas Coladas de lava
Depósitos eólicos	Dunas, medanos Loess Cenizas volcánicas
Depósitos glaciares	Morrenas y tillitas Fluvioglaciares, valle glaciar, abanicos de lavado
Depósitos antrópicos	Rellenos sanitarios o de basuras Rellenos de excavaciones Escombreras o botaderos

Fuente: Hermelín, 1985, y Salazar,1995.

Criterios para la definición preliminar de las UGI

Homogeneidad y escala

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 2, la UZI mínima cartografiable está definida por la escala de trabajo; por tanto, la UGI mínima cartografiable en mapas a escala 1:2000 será de 400 m², mientras que para mapas a escala 1:5000 será de 2500 m². Las unidades también se deben delimitar teniendo en cuenta la escala vertical; es decir, el espesor de los materiales define la delimitación de la unidad. Para cartografía geológica a escala 1:5000, el espesor es de 5 m, y para la escala 1:2000, es de 2 m.

La definición de cada unidad tanto en roca como en suelo, según la escala de trabajo, debe tener en cuenta que representen alto grado de homogeneidad con respecto a las propiedades geotécnicas básicas, cumpliendo con las características de área y espesores mínimos cartografiables.

Origen y litología

Se debe hacer una identificación preliminar de la unidad con base en su origen (tabla 3-1), que se complementará posteriormente de acuerdo con sus características litoestratigráficas, esto es, la caracterización litológica (composición y estructura) de las sucesiones estratigráficas.

Esta clasificación preliminar permite diferenciar entre rocas y suelos, y estos últimos diferenciados entre transportados, residuales o antrópicos. Además, es importante plasmar en la leyenda de cada UGI el material que la subyace y suprayace, y sus características geotécnicas básicas.

Nomenclatura

Una vez establecidas las posibles UGI, identificadas preliminarmente por el origen y la litología, se define la nomenclatura asociada, la cual se ajusta de acuerdo con la caracterización de los materiales en la actividad de comprobación de campo.

El sistema de nomenclatura propuesto es el siguiente:

- La primera letra, en mayúscula, indica si es roca (R) o suelo (S).
- Si es roca (R), la segunda letra, en minúscula, indica su calidad, según sus características de resistencia cualitativa, grado de meteorización y el diaclasamiento, entre otras, la cual se ajustará según la caracterización realizada cuantitativamente, que se denomina muy dura (md), dura (d), intermedia (i), blanda (b) y muy blanda (mb).
- Si es suelo (S), la segunda letra indicará el origen: transportado (t), residual (r) o antrópico (a).
- La tercera letra indica el tamaño del grano predominante o la textura del material.
- Se pueden agregar al nombre otras letras que indiquen las características geotécnicas del material.

En el anexo A-1 se presentan algunos ejemplos de nomenclatura para las UGI, según estudios de caso realizados por el Servicio Geológico Colombiano (2012, 2013) en ambientes geológicos sedimentarios y volcánicos.

Delimitación de las UGI preliminares en la cartografía básica

Las unidades de terreno delimitadas y caracterizadas, que son la base de la definición de las UGI, deben demarcarse preliminarmente con base en la clasificación del terreno en unidades geomorfológicas con apoyo de la cartografía básica, el MDT, las fotografías aéreas y demás imágenes remotas disponibles en el área de estudio.

Para la descripción de las unidades en campo se deben describir en forma separada los atributos del material y los atributos de la masa, independientemente de que se trate de suelos o rocas.

La caracterización comprende el levantamiento de datos estratigráficos y datos que inciden en el comportamiento mecánico de los materiales, caracterización sobre litología

y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos semejantes, así como la descripción de secuencias estratigráficas en afloramientos y definición de puntos de muestreo de roca y suelo. Se complementa esta información de campo con la información de exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio.

A renglón seguido se presenta una lista de las propiedades índice descriptivas que se deben obtener en el trabajo de campo, tanto de las unidades de suelo como de las de roca (tabla 3-2).

Tabla 3-2. Caracterización de las unidades de suelo y roca, con énfasis en geología para ingeniería

MATERIAL GEOLÓGICO		PROPIEDADES (DESCRIPCIÓN DE CAMPO)
ROCA		
Masa Rocosa		Rasgos estructurales Perfil de meteorización Discontinuidades Resistencia de masa Permeabilidad secundaria Génesis Litología Color
Material Rocoso		Grado de meteorización Resistencia Textura – fábrica Tamaño y forma del grano
SUELO		
Masa de suelo		Génesis Textura y composición Perfil del suelo Humedad natural Permeabilidad cualitativa Estructuras
Material de suelo	Clastos	Tipo Color Forma Redondez Orientación Grado de meteorización
	Matriz	Color Granulometría Plasticidad Resistencia
	Suelos Finos	Resistencia no drenada (consistencia)
	Suelos Gruesos	Densidad relativa de los suelos (compacidad) Forma de los granos Redondez de los granos Orientación de los granos

Unidades de roca

Para la descripción y caracterización de las unidades de roca en cartografía geológica con fines de ingeniería, se debe diligenciar en campo el formato para caracterización de macizo rocoso que se incluye en el anexo A-2. Éste contiene todas las clases referidas a cada uno de los parámetros relacionados en él, con el fin de señalar al profesional que realiza el trabajo de campo las pruebas indicativas para la clasificación de los materiales.

El levantamiento de las discontinuidades permite definir las familias y su orientación con respecto a la dirección del talud, así como el espaciamiento, persistencia, abertura, rugosidad y resistencia de las paredes, que determinan en un macizo rocoso su comportamiento ante cargas y cortes o excavaciones; por tanto, los tipos de discontinuidades que se pueden diferenciar en un afloramiento rocoso incluyen las diaclasas, planos de estratificación, laminación, foliación, fallas, diques y superficies de contacto entre rocas sedimentarias y metamórficas o ígneas.

La caracterización geomecánica de macizos rocosos se puede hacer con base en los sistemas de clasificación de macizos, tales como el RMR propuesto por Bieniawski (1973) y la modificación de este que propuso Romana (1985) –denominada el SMR–, el Índice de Resistencia Geológica (GSI, por su sigla en inglés) propuesto por Hoek y Brown (1997) o el valor de Q de Barton et al. (1974). En esta guía se sigue el método del SMR.

Unidades de suelo

Se definen como suelos aquellos materiales sueltos o inconsolidados, compuestos de una mezcla de materia orgánica, fragmentos de roca, arcilla y minerales, producto de la descomposición *in situ* del material rocoso o de sedimentos transportados por diferentes medios. Se consideran materiales que se pueden excavar fácilmente por métodos manuales y se clasifican como suelos residuales (horizonte VI del perfil de meteorización de Dearman, 1995) y transportados (depósitos de gravedad-coluvial, aluviales, glaciares y eólicos, entre otros). Para la descripción de los suelos se sugiere usar el formato de campo que se presenta en los anexos A-3.1 y A-3.2.

Hidrogeología

En el Decreto 1807 de 2014 se contempla la hidrogeología del área de estudio, tanto para estudios básicos como para estudios detallados. En esta guía, los aspectos hidrogeológicos se centran en la obtención de los niveles freáticos como detonantes de movimientos en masa; sin embargo, es importante establecer un análisis cualitativo en las áreas de análisis de las condiciones de permeabilidad de las unidades litoestratigráficas que se definen.

Para cada sitio en particular, la relación frecuencia de ocurrencia vs. magnitud de la lluvia determina la frecuencia de ocurrencia de los deslizamientos y, en cierta medida, su magnitud, por su efecto detonante. Desde el punto de vista hidrogeológico, para estimar la relación existente entre la generación de movimientos de masa y la lluvia en un sitio particular resulta necesario considerar factores como la magnitud y frecuencia de la precipitación, las características del suelo superficial (textura, porosidad, cobertura vegetal, uso, etc.), la magnitud y variabilidad de la infiltración, el contenido de humedad del medio

poroso (suelo), la variación del nivel freático y la tipología del movimiento, según las características intrínsecas del suelo objeto de análisis.

Dado que en el ámbito de la ingeniería el concepto de hidrogeología está relacionado con el flujo de agua subterránea en los estratos profundos del suelo, vale la pena aclarar que en la presente guía el uso de este término está más relacionado con la estimación de la posición del nivel freático medio y su variabilidad en un año típico para la localidad de interés, presumiendo que la precipitación que se infiltra en el suelo es la principal causa de la fluctuación del nivel freático, pues no se consideran procesos de recarga regional, flujo subterráneo ni interacciones con los cauces. Con este enfoque se estimará la profundidad del nivel freático, tanto dentro del análisis básico a escala 1:5000 como en el análisis de la amenaza al deslizamiento a escala 1:2000, correspondiente a los estudios detallados.

En los macizos de roca el flujo de agua está concentrado preferencialmente en las diaclasas abiertas, y las cabezas hidráulicas generadas dependen de la intercomunicación que existe entre las discontinuidades. Es muy común la ocurrencia de fallas, como consecuencia de altas cabezas que operan como cuñas hidráulicas. El evaluador debe verificar en campo las posibles fuentes de recarga que generen presiones de agua sobre el macizo.

Mapas de UGI

Un mapa de UGI debe contener la leyenda de cada una de las unidades identificadas en cuanto a sus características litoestratigráficas y las propiedades físicas y mecánicas obtenidas a partir del levantamiento en campo. Para la descripción de las propiedades es clave contar con la información básica contenida en los formatos de los anexos A-2, A-3.1 y A-3.2.

Es muy importante destacar que el mapa de UGI, preparado inicialmente en oficina, debe tener verificación y ajustes de campo.

3.1.1.2 Geomorfología

En atención a las escalas de trabajo propuestas, se requiere un mapa geomorfológico detallado en lo referente a elementos geomorfológicos del área de estudio, los cuales se consideran un insumo primordial para la homogeneización de las unidades con características de comportamiento geomecánico similar, junto con el mapa de geología para ingeniería.

El elemento geomorfológico corresponde al máximo nivel de detalle de una unidad geomorfológica, definida por los rasgos de relieve, por la morfometría detallada del terreno y por los microrrelieves asociados con una característica litológica con base en análisis detallados (Carvajal, 2012). Para la construcción del mapa de elementos geomorfológicos a escala 1:5000 o 1:2000, se recomienda seguir la guía presentada por el SGC (Carvajal, 2012), cuyos aspectos más relevantes se describirán brevemente en este documento. El objetivo fundamental se centra en identificar y caracterizar las geoformas desde los siguientes puntos de vista: morfogénesis, morfología, morfometría y morfodinámica.

Las etapas básicas generales que se plantean para la generación de esta cartografía temática corresponden a las descritas en el numeral anterior, en cuanto a las actividades iniciales como recopilación y análisis de la información asociada al tema y el reconocimiento preliminar de campo, con las cuales se busca familiarizarse con las geoformas y el ambiente geomorfológico presentes en el área de estudio.

Nomenclatura

Una vez establecidos el ambiente morfogenético del área de estudio y los posibles elementos geomorfológicos presentes, se define la nomenclatura asociada, la cual se ajustará de acuerdo con la caracterización de los elementos en campo. El sistema propuesto es el siguiente:

- La primera letra, en mayúscula, indica el origen de la geoforma: morfoestructural (S), volcánico (V), denudacional (D), fluvial (F), marino-costero (M), glacial (G), eólico (E), kárstico (K), antropogénico (A).
- A partir de la segunda letra, en minúscula, se indican características particulares del elemento, rasgo o proceso geomorfológico.

En el formato del anexo A-4 se presentan ejemplos de nomenclatura de elementos geomorfológicos, según algunos estudios de caso realizados por el Servicio Geológico Colombiano (2014) en ambientes sedimentarios y volcánicos, en los que se ha adoptado el sistema de clasificación morfogenética del International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC). Otros ejemplos pueden encontrarse en Carvajal (2012).

Fotointerpretación

Al igual que para las UGI, en las planchas que contienen la cartografía básica se definen los polígonos que identifican los elementos geomorfológicos, con base en los sensores remotos disponibles en el área de estudio y en el mapa hipsométrico generado a partir del MDT, definiéndose las alturas relativas (índice de relieve) y la pendiente del terreno, información importante para ir delimitando las áreas de terreno que presentan formas y características homogéneas.

De acuerdo con las características que definen los elementos geomorfológicos en cuanto a morfogénesis, morfología y morfometría, se propone caracterizarlos a partir de diferentes aspectos, los cuales se relacionan en el formato propuesto por el SGC (anexo A-5).

Mapa de elementos geomorfológicos

Definidos los elementos geomorfológicos, se obtienen los respectivos mapas con la nomenclatura y leyenda asociadas a cada una de las unidades, según la fotointerpretación y la información recopilada en campo, en cada uno de los formatos. Este mapa debe complementarse con la información del catálogo e inventario de movimientos en masa que se describe en el numeral siguiente, pues dicha información es parte de las expresiones morfodinámicas del área de estudio.

3.1.1.3 Catálogo e inventario de movimientos en masa

Para establecer aquellos movimientos en masa que afectaron o afectan a la zona de estudio, se consolida el catálogo histórico municipal de procesos de inestabilidad o se hace un registro de los actuales mediante información levantada en campo y con el uso de imágenes de sensores remotos de resolución adecuada.

El Servicio Geológico Colombiano cuenta con el Sistema de Información de Movimientos en Masa (Simma), el cual dispone de una base de datos de movimientos en masa ocurridos en el territorio nacional desde 1917. En esta base de datos hay dos niveles de información: catálogo histórico e inventario de movimientos en masa. El catálogo histórico contiene fecha de reporte y del evento, localización geográfica, clasificación del movimiento y daños, información cuya fuente son los medios de comunicación y los entes territoriales de gestión de riesgo. En el inventario de movimientos en masa hay información técnica levantada en campo sobre movimientos en masa, en la cual se incluyen además datos relacionados con el tipo y actividad del movimiento en masa, su morfometría, material involucrado, causas, daños, entre otros.

Catálogo de movimientos en masa

La información que se proporciona en el catálogo histórico es fundamental en la zonificación de amenazas por movimientos en masa, ya que junto con el inventario de movimientos de masa constituye la principal cobertura de información con fines de calibración y validación de los resultados.

Para recopilar esta información se acude a las entidades locales, regionales o nacionales que registran o atienden las emergencias o realizan visitas técnicas asociadas a la inestabilidad de laderas, como Bomberos, Defensa Civil, Oficina de Gestión del Riesgo del municipio, Oficina de Planeación municipal, corporación autónoma regional, Crepad, gobernación, SINA, SGC-Simma, o a reportes en periódicos, entre otros.

Si bien el catálogo no es detallado en cuanto a la descripción técnica del evento (tipo de movimiento, material involucrado, actividad y morfometría), aporta una valiosa información histórica para los fines de calibración y validación de la zonificación de amenazas por movimientos en masa. Hay que hacer una cuidadosa interpretación de los datos en cuanto a localización, causas y efectos, debido a las limitaciones de las fuentes consultadas.

Inventario de movimientos en masa

El inventario de movimientos en masa se debe generar a partir del levantamiento en campo de procesos de inestabilidad, usando el formato presentado en el anexo A-6, adoptado por el Proyecto Multinacional Andino Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA) (2007) y ajustado por el SGC con base en la experiencia de los últimos años. Los conceptos relacionados con este tema están descritos en la publicación del PMA-GCA (2007).

Como se ha mencionado, además de la información levantada en campo se puede hacer uso de sensores remotos para complementar el inventario e incluso para establecer la temporalidad de los eventos.

A causa de la escala de trabajo y la metodología por aplicar en la zonificación de amenazas por movimientos en masa, todos los movimientos se deben caracterizar con el respectivo formato y llevar a la plataforma del Simma del SGC, para lo cual se deben cumplir los siguientes requerimientos: completitud del formato, tres fotos del movimiento caracterizado esquemas en planta y en perfil que indiquen los elementos expuestos, la localización geográfica y el norte. Las afectaciones y daños causados son un insumo importante en la caracterización del movimiento en masa.

Mapa de catálogo, inventario de movimientos en masa e informe

En el mapa de elementos geomorfológicos se incluyen los movimientos en masa inventariados diferenciados, de acuerdo con el tipo de mecanismo. Dicho mapa, según Verstappen y Van Zuidam (1992), constituye un mapa pragmático en el que se presentan de manera sencilla los principales procesos activos sobre la zona de estudio, en forma de polígonos, a los cuales se les asocia un código alfanumérico de enlace con la base de datos.

En el mapa de elementos geomorfológicos se incluye además la información proveniente del catálogo histórico una vez hechos un análisis y una depuración de la base de datos, en la que las convenciones utilizadas deben simbolizar el tipo o mecanismo de falla interpretado del reporte del movimiento.

El informe debe contener el análisis estadístico de los datos de inventario y catálogo de movimientos en masa y su relación con las unidades de geología para ingeniería, donde se presentan los tipos de mecanismos de movimientos en masa, la recurrencia, los factores detonantes, la influencia de la cobertura y el uso, la pendiente del terreno y las demás causas que puedan estar asociadas a la inestabilidad de las laderas en el área de estudio.

Gracias a esto, se podrá definir el tipo de análisis de estabilidad que se debe efectuar en la zonificación básica y detallada de amenaza por movimientos en masa.

3.1.1.4 Cobertura y uso del suelo

Los mapas de cobertura y uso del terreno se elaborarán de acuerdo con la metodología Corinne Land Cover, adaptada para Colombia por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam) (2010).

El alcance de la información de cobertura y uso del suelo está relacionado con la estimación del denominado número de curva (CN, por su sigla en inglés), del método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, el cual se ha incorporado a la presente guía para estimar el aporte de la lluvia en términos de nivel freático, lámina o altura de agua, al considerar la lluvia como un detonante de movimientos en masa; para tal fin se ha tenido en cuenta el efecto del componente de las abstracciones. En materia de cobertura y uso del suelo se deberán valorar los aspectos antrópicos relevantes en la zonificación de amenaza por movimientos en masa, como cambios en el uso, cortes de laderas y explanaciones.

El valor de CN depende de la cobertura y uso del terreno, al igual que de la clasificación hidrológica del suelo superficial (A, B, C y D), la cual tiene en cuenta la textura, espesor y origen de los suelos.

Si existen mapas de cobertura y uso del terreno del área de estudio, contenidos en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y el Pomca, que se encuentren actualizados y se hayan realizado a la escala de trabajo adecuada a los análisis que se presentan en esta guía, se pueden utilizar como la cobertura temática definitiva y usada para los fines descritos. Sin embargo, en general esta información se debe actualizar a causa de los continuos cambios en la cobertura, en particular por estar asociada a zonas urbanas, periurbanas y de expansión.

Como para todos los temas anteriores, considerados factores condicionantes de la generación de movimientos en masa, es importante reconocer primero el campo, lo cual permite

establecer una definición inicial de las unidades de cobertura del terreno ajustada a la metodología Corinne Land Cover, las cuales se presentan en el anexo A-7 para los niveles 1 a 5. A continuación se presenta una descripción general de las actividades requeridas para obtener la cobertura y uso del suelo como tema asociado a los movimientos en masa.

Fotointerpretación y generación del mapa preliminar

Se definirán polígonos con unidades homogéneas de cobertura y uso del terreno, a las cuales deben asociarse como atributo las características que las identifican y definen, con base en la información actualizada de sensores remotos de la que se disponga.

Caracterización de unidades y contenido de la leyenda

Para esta etapa del proceso de conformación de un mapa de cobertura y uso del terreno, se deberá considerar el propósito para el cual se requiere dicha información dentro de la presente guía. En efecto, la cobertura vegetal influye en la estabilidad de los depósitos de suelos y macizos rocosos mediante efectos que se pueden clasificar como hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden efectos sobre la capacidad de infiltración, la humedad y la evapotranspiración. Entre los mecánicos están el incremento de la resistencia que le proporcionan las raíces al suelo, la protección frente a la erosión o la sobrecarga que los árboles pueden generar sobre las laderas.

Por lo anterior, la caracterización se ha de enfocar en diferenciar y describir cualitativamente aspectos tales como el tipo, densidad y profundidad efectiva de las raíces, tipología, tamaño y características de las especies vegetales como generadoras de carga y resequeidad del suelo, zonas de bosques, áreas afectadas por prácticas culturales de manejo del suelo para cultivos que promuevan la inestabilidad, áreas urbanizadas con distinto grado de impermeabilización de la superficie del terreno, y áreas con presencia de obras de drenaje y alcantarillado. Estos aspectos se deben centrar en analizar las causas y posibles soluciones de los movimientos de masas.

Control temático de campo, elaboración del mapa e informe de cobertura y uso del suelo

El control de campo por parte del especialista a cargo permitirá precisar la consistencia del trabajo efectuado previamente en oficina y ajustar las unidades tanto en extensión como en caracterización, haciendo las observaciones y muestreos en campo que se requieran para dotar el mapa de información útil para los posteriores análisis.

El informe se debe enfocar en la descripción de los aspectos enunciados en este numeral y constituir una base útil para clasificar las unidades de cobertura y uso del terreno, de acuerdo con los requerimientos de método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos correspondientes al número de curva, tal como se indica en los apartes de la presente guía dedicados a la lluvia como detonante de movimientos en masa (numerales 3.1.3.1 y 3.2.4.1), al igual que para correlacionar dichas coberturas y usos con los movimientos en masa, actuales y potenciales.

3.1.1.5 Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio

La exploración del subsuelo es una etapa que, por su importancia y su costo relativo en los estudios, conviene definir de manera cuidadosa. El plan de exploración se determina a partir de los mapas de UGI y de elementos geomorfológicos, lo cual permitirá, a partir de los ensayos de laboratorio, definir los parámetros mecánicos del modelo geológico-geotécnico que se menciona en el numeral 3.1.2, tanto para el análisis de amenaza básica a escala 1:5000 como para los análisis detallados de estabilidad requeridos para la zonificación de amenaza a escala 1:2000.

De conformidad con lo anterior, la exploración del subsuelo se debe diseñar con este enfoque, que en términos generales contempla una primera etapa, llamada de *exploración básica* (escala 1:5000), en la que se busca caracterizar las unidades geológicas y geomorfológicas encontradas, y una segunda etapa, denominada de *exploración detallada* (escala 1:2000), que es de mayor densidad y está concentrada en los sectores de amenaza alta identificados en los estudios básicos de amenaza.

En esta guía se presentan las recomendaciones sobre la exploración que se debe hacer y se dan lineamientos generales respecto a la posible ubicación de los sitios de exploración. Sin embargo, en razón de las particularidades de cada zona de estudio, el geotecnista encargado deberá definir la cantidad y el tipo apropiado de exploración que hay que realizar.

Exploración básica

Como ya se indicó, el objetivo de esta exploración es la caracterización de las unidades del modelo geológico-geotécnico, tanto en el casco urbano del municipio como en las zonas de posible expansión, definidas previamente, para lo cual se recomienda ejecutar la siguiente exploración del subsuelo:

- Un apique de 1,5 m de profundidad o un sondeo de mínimo 3 m de profundidad por cada 5 ha de superficie. La exploración debe incluir cada una de las UGI identificadas; si esto no es posible con la densidad de exploración descrita, hay que hacer apiques o sondeos adicionales, con el fin de que todas las UGI queden caracterizadas. Se deberá llevar a cabo por lo menos un sondeo de 15 m de profundidad cada 50 ha, y su localización se tendrá que definir con base en las condiciones particulares de estabilidad identificadas por el equipo técnico consultor.
- Cuando el espesor de las UGI no se pueda determinar a partir de la exploración antes indicada o cuando no se logre llegar con ella hasta la probable superficie de deslizamiento, definida con criterios geomorfológicos, habrá que llevar la exploración hasta las profundidades requeridas.
- Se deberá hacer, en lo posible, muestreo continuo y por lo menos se tendrá que tomar una muestra por cada metro de perforación y dos muestras por cada apique, utilizando equipos y técnicas que minimicen la alteración de las muestras.
- Es clave determinar la posición del nivel de agua en las perforaciones y su variación durante el periodo que dura la exploración, ya que estos niveles son básicos para los análisis de estabilidad posteriores. En caso de no encontrarse el nivel del agua, este hecho se debe indicar claramente en el informe.

Esta exploración se podrá complementar con exploración indirecta, de tal manera que se puedan identificar los estratos y zonas geotécnicamente homogéneos que conforman el subsuelo en el área de estudio.

Exploración detallada

En las zonas identificadas para hacer estudios detallados, se deben seleccionar secciones representativas de análisis; en ellas se recomienda ubicar por lo menos tres sondeos que permitan identificar el perfil geotécnico, el espesor de los materiales y la zona de falla potencial. Estos sondeos tendrán que llegar, mínimo, hasta 3 m por debajo de la superficie estimada de deslizamiento; si esta superficie se encuentra en el contacto suelo-roca, se deberá profundizar en la roca por lo menos 1 m. En caso de realizar exploración geofísica, se podrá suprimir uno de los sondeos, siempre y cuando sea posible inferir el perfil del subsuelo en forma adecuada.

- Se recomienda ejecutar un punto de exploración por cada 25.000 m² de área de terreno. Su ubicación se deberá justificar en términos del adecuado cubrimiento de las áreas de interés.
- Se acepta el empleo de métodos de exploración indirectos, tales como los geofísicos, para establecer espacialmente la disposición de los materiales involucrados, en cuyo caso el número de puntos de exploración se podría reducir como máximo en un 25 %, siempre y cuando esté claramente justificado por el ejecutor del estudio, quien, en cualquier caso, debería mostrar para el sitio por lo menos dos sondeos de calibración que le permitan extender con propiedad los resultados de las interpretaciones de los registros geofísicos.
- Es fundamental que los equipos para exploración y de ensayos *in situ* respondan a la naturaleza de los materiales y su condición en el sitio, requisito que se exige especialmente para suelos blandos. Materiales con comportamientos especiales, como los descritos en el capítulo H.9 de la NSR-10, se deberán reconocer e identificar como allí se establece, y caracterizar apropiadamente.
- Los sondeos en roca deben permitir la obtención de muestras de tipo núcleo. Además, se ha de llevar un registro minucioso de los porcentajes de recuperación, acompañado de un levantamiento detallado de la disposición de las unidades litológicas y de las discontinuidades.
- Se deberá hacer, en lo posible, muestreo continuo y por lo menos tomarse una muestra por cada metro de perforación y dos muestras por cada apique.

Es clave determinar la posición del nivel de agua en las perforaciones y su variación durante el periodo que dura la exploración, puesto que tales niveles son básicos para los posteriores análisis de estabilidad. Si no se encuentra el nivel del agua, este hecho se debe indicar claramente indicado en el informe. En casos especiales que requieran seguimiento, se recomienda instalar piezómetros para monitorear los niveles del agua y sus variaciones con las condiciones meteorológicas.

Los métodos de exploración deben ajustarse a las siguientes normas:

- INV E-101-07 (Investigación de suelos y rocas para propósitos de ingeniería).
- INV E-105-07 (Obtención de muestras para probetas de ensayo mediante tubos de pared delgada).

Ensayos de laboratorio

Todas las muestras obtenidas en la fase de exploración deberán trasladarse de forma adecuada a un laboratorio de suelos. Los tipos de ensayos y la cantidad sugerida se indican en la tabla 3-3 como porcentaje del número total de muestras.

Tabla 3-3. Porcentaje mínimo de ensayos que se recomienda realizar sobre el total de muestras obtenidas

TIPO DE ENSAYO	MUESTRAS (%)	NORMA	NORMA ASTM
Humedad natural	90	NTC-1495-01	ASTM D2216-11
Límites	40	NTC-4630-99	ASTM D4318-11
Granulometría	30	NTC-152299	ASTM D2487-11
Hidrometría	20	INV E-124-07	ASTM D2487-11
Peso unitario	50	INV E-217-07	ASTM D4254-11
Peso específico	10	INV E-223-07	ASTM D4254-11
Compresión simple	12	NTC-1527-00	
Corte directo	10	NTC-1917-00	ASTM D3080-11
Triaxial	5	INV E-153-07	ASTM D4829-11
Triaxial cíclico	2	INV E-153-07	ASTM D3999-11
Consolidación	5	NTC-1967-00	ASTM D2435-11
Expansión	3	INV E-132-07	ASTM D5311-13
Compresión roca	3		ASTM D7012-13

En las muestras recuperadas a partir de la exploración básica se recomienda hacer ensayos que permitan la caracterización física de los materiales. En las muestras resultantes de la exploración detallada se recomienda intensificar los ensayos tendientes a la caracterización mecánica.

3.1.2 Modelo geológico-geotécnico

Las condiciones intrínsecas que determinan la estabilidad del terreno, como tipo de material, espesor, pendiente, condiciones de agua, cobertura, etc., presentan variabilidad espacial; por lo tanto, resulta conveniente identificar unidades geotécnicamente homogéneas, con el fin de plantear en cada caso un modelo conceptual que involucre en forma consistente las características geológicas y geomorfológicas y los parámetros geotécnicos, de modo que se puedan hacer cálculos de estabilidad para obtener en cada zona la amenaza por remoción en masa de manera determinística, basada en el cálculo de los factores de seguridad.

3.1.2.1 Determinación de unidades geotécnicas homogéneas

Las unidades geotécnicas homogéneas se obtienen a partir de un cruce del mapa de UGI y del mapa de elementos geomorfológicos del área de estudio, las cuales se han ajustado con base en los resultados de la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio. Adicionalmente, se deben dividir las UGI con base en el espesor del suelo de la siguiente manera (tabla 3-4).

Tabla 3-4. Clasificación del espesor de suelo

ESPESOR DE SUELO (m)	DESCRIPCIÓN
>1,5	Muy profundo
1,0-1,5	Profundo
0,5-1,0	Moderadamente profundo
0,25-0,5	Superficial
<0,25	Muy superficial

Fuente: Van Zuidam, 1985.

Con la discretización de toda la zona de estudio con base en una malla definida en un SIG, se generan columnas de suelo o roca, para las cuales se debe conocer su estratificación, profundidad y nivel de agua. El tamaño de celda debe estar de acuerdo con los criterios presentados en el capítulo 2.

Para cada una de las unidades geotécnicas homogéneas definidas se establece un modelo geológico-geotécnico con base en la información geológica y geomorfológica, y el reconocimiento geotécnico inicial por parte de los expertos. Los elementos que se deben definir son:

- Pendiente del terreno, a partir del MDT.
- Espesor del suelo y su variación dentro de la unidad geotécnica.
- Litoestratigrafía hasta el sustrato rocoso.
- Posición del nivel freático.

Los parámetros geotécnicos para cada unidad geotécnica homogénea se determinan a partir de la exploración del subsuelo, los ensayos de laboratorio y la caracterización geomecánica de las unidades. Para el análisis de estabilidad se debe conocer el peso unitario, intercepto de cohesión y ángulo de resistencia interna de los estratos identificados en cada unidad geotécnica homogénea.

Las características de la posición del nivel freático y su relación con las condiciones de lluvia se describirán en el numeral sobre el factor detonante lluvia.

3.1.3 Factores detonantes

Los factores detonantes considerados para los análisis de amenaza son la lluvia y el sismo. Aunque los factores son los mismos para las dos escalas de análisis, el tipo de dato, resolución y su tratamiento se han evaluado en forma distinta. A continuación se presenta la metodología para la determinación de los factores detonantes en estudios básicos.

3.1.3.1 Lluvia

Una vez definidas las unidades geotécnicas para los análisis básicos, será necesario contar con cierta información de campo para evaluar la inestabilidad resultante de la acción hídrica relacionada con la fluctuación del nivel freático. A partir del muestreo de campo, realizado de acuerdo con lo estipulado en la exploración básica del subsuelo (numeral 3.1.1.5), se deberá obtener una profundidad de la tabla de agua, además de las propiedades del suelo que se indicarán en los siguientes párrafos.

En razón de que en los deslizamientos la posición del nivel freático es generalmente un condicionante de la inestabilidad, resulta clave calcular la profundidad de la tabla de agua, asociada a un cierto periodo de retorno, para el cual se considera que ocurrirá la falla. La experiencia sugiere utilizar un periodo de retorno de 20 años.

En virtud de que los deslizamientos profundos ocurren debido a un incremento en la presión de poros del suelo generado por el ascenso del nivel freático, y que estos procesos están asociados a largos periodos de lluvia, se requiere relacionar de alguna manera la variación del nivel freático con la variabilidad de la lluvia acumulada para largos periodos. Dicha estimación se ha de realizar en atención a que existe una relación directa entre el volumen acumulado de agua caída en un periodo de lluvia y el ascenso del nivel freático, ya que por lo general en nuestro medio no se cuenta con registros de nivel freático levantados sistemáticamente. A falta de una opción más precisa y con el anterior supuesto, se sugiere asignarle una variabilidad a la profundidad del nivel freático en función de la variabilidad temporal de la precipitación. En este contexto, el análisis de amenaza básica por movimientos en masa debe hacerse considerando como profundidad promedio de la tabla de agua la profundidad del nivel freático levantada durante la exploración de campo.

Por otra parte, dado que una porción de la lluvia que cae al suelo se infiltra, que otro porcentaje queda detenido en la vegetación y en depresiones del suelo mientras se evapora y que otro más fluye como escorrentía directa, es conveniente utilizar la fracción que se infiltra para calcular la variabilidad de la profundidad del nivel freático, tomando en cuenta las características de la vegetación y de los suelos superficiales. Para estimar dicha fracción de agua infiltrada se propone utilizar el método lluvia-escorrentía del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, el cual se emplea muy frecuentemente en nuestro medio para calcular la cantidad de agua proveniente de una tormenta (P) que se convierte en escorrentía directa (P_e), pero que en este caso se propone utilizar para estimar el complemento, esto es, el resto de la lluvia que no se convierte en escorrentía directa, es decir: ($P_i = P - P_e$), que de acuerdo con el método del SCS corresponde a la suma de las abstracciones iniciales (I_a) antes del encharcamiento y a la profundidad de agua retenida en el suelo (o abstracción continuada, F_a), $I_a + F_a = P_i$, lo que en adelante se denominará *lluvia infiltrada*.

En consecuencia, para estimar la variabilidad del nivel freático a partir de la variabilidad de la magnitud de la infiltración, se requiere contar con la siguiente información:

- Una clasificación de los suelos de la unidad geotécnica de análisis, según los tipos A, B, C o D con base en los criterios del SCS. Esta clasificación se deberá hacer considerando la textura, espesor y origen de los suelos, de acuerdo con el criterio del experto en hidrología a partir de la información básica recolectada.
- Una descripción detallada de la cobertura y uso del suelo de la zona de análisis que permita clasificarla de acuerdo con el SCS, a partir de la tabla 3-5 o similar.
- Datos de precipitación diaria de una estación meteorológica próxima a la cabecera del municipio objeto de la presente evaluación de amenaza, seleccionada teniendo en cuenta los siguientes criterios: a) La estación debe representar adecuadamente el régimen de precipitación de la zona de interés, a juicio del hidrólogo analista; b) La estación debe estar localizada lo más próximo posible a la zona de interés. En caso de duda con respecto a la localización de varias estaciones próximas, se recomienda trazar polígonos de Thiessen para precisar la estación que se va a utilizar (Linsley et al., 1977); c) La diferencia entre la cota de

la cabecera del municipio y la elevación de la estación no habrá de ser mayor de 500 m; d) La estación debe contar con un registro de precipitación diaria de por lo menos quince años.

- Un estimativo de la profundidad media del nivel freático. En ausencia de información más precisa, considerarla igual a la profundidad medida en la exploración geotécnica de campo. En aquellos casos en que se encuentre a gran profundidad y no se logre medir, se podrá considerar como condición crítica que dicho nivel medio coincide con el de la profundidad de la superficie de falla. La profundidad media que se asuma servirá de referencia para añadirle el estimativo de su variabilidad, la cual se podrá suponer igual a la del acumulado anual de la lluvia que se infiltra (abstracciones), según lo descrito en este apartado.

El procedimiento propuesto es, entonces, el siguiente:

1. Identificar un valor promedio de número de curva (CN) de la unidad geotécnica por analizar, donde se muestran los valores para diferentes grupos hidrológicos de suelo y usos de estos para condiciones de humedad antecedente normal (AMC II), a partir de la tabla siguiente (tabla 3-5).

Tabla 3-5. Valores de número de curva para diferentes grupos hidrológicos y de usos de suelo

USO DE SUELO	GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
Tierra cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales				
Condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos	30	58	71	78
Bosques				
Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
Óptimas condiciones: cubierta en pasto (75 % o más)	39	61	74	80
Condiciones aceptables: cubierta en pasto (50 al 75 %)	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
Residencial				
Tamaño promedio lote porcentaje promedio impermeable				
1/8 de acre 65	77	85	90	92
1/4 de acre 38	61	75	83	87
1/3 de acre 30	57	72	81	86
1/2 de acre 25	54	70	80	85
1 de acre 20	51	68	79	84
Parqueadero pavimentado, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: Chow et al., 1994.

Teniendo en cuenta la siguiente clasificación hidrológica de los suelos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, suelos francoarenosos.

Grupo C: Suelos francoarcillosos, francoarenosos poco profundos, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcillas.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

2. Calcular la retención potencial máxima S como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3-1)$$

Donde

S está en milímetros y CN corresponde al número de curva previamente seleccionado como representativo de la zona para la condición de humedad antecedente II. Se considera suficiente en este caso utilizar el número de curva para la condición II de humedad antecedente para todo el registro de precipitación. Como se recordará, el método del Soil Conservation Service considera números de curva para tres condiciones de humedad antecedente (I, II y III), que para las estaciones climáticas en las cuales hay crecimiento de vegetación se determinan según la precipitación acumulada de los cinco días previos al del análisis: inferior a 35 mm, entre 35 y 53 mm, o superior a 35 mm, respectivamente.

3. Calcular, a partir de los registros de precipitación diaria (P), la precipitación infiltrada en 24 horas (P_i), a partir de la ecuación del método lluvia-escorrentía del SCS.
4. Acumular los valores diarios de precipitación infiltrada para cada año calendario del registro y así obtener el valor de precipitación infiltrada total anual.
5. Calcular la precipitación infiltrada media multianual (\bar{x}), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación (CV).
6. Añadir, para el análisis de amenaza, alrededor de la profundidad del nivel freático medio la variabilidad de la lluvia infiltrada en función de la desviación estándar, expresada en términos del coeficiente de variación por la media de la profundidad del nivel freático.

En razón de que para el análisis básico de la amenaza a escala 1:5000 se requiere asumir la profundidad del nivel freático correspondiente a una lluvia con periodo de retorno de 20 años y teniendo en cuenta que aquí no se exige realizar modelación hidrogeológica alguna, deberá tomarse dicho valor de precipitación a partir de las curvas IDF que se indican en el numeral 3.2.4.1 para un periodo de retorno de 20 años y una duración de 24 horas; calcular la precipitación infiltrable correspondiente, asumiendo una condición antecedente de humedad (II), deducir esa altura de precipitación a la profundidad del nivel freático sujeta como media y restar 1,65 veces la desviación estándar (σ) del análisis de acumulados anuales de precipitación infiltrable. Este análisis se hace suponiendo una variación a largo plazo del nivel freático que sigue una distribución normal con un periodo de retorno de 20 años, así que la profundidad del nivel freático para dicho periodo se puede estimar con una ecuación (ecuación 3-2) e ilustrarse en una figura (figura 3-2).

$$P_{f20} = (\bar{P}_f - 1,65 CV P_f) - (I_{i20} * 24) \quad (3-2)$$

Donde

P_{f20} corresponde a la profundidad del nivel freático asociado a una lluvia de 20 años de periodo de retorno, en milímetros.

\bar{P}_f corresponde a la profundidad media del nivel freático, en milímetros.
 $CV \bar{P}_f$ corresponde a la desviación estándar asignada a la variación del nivel freático, expresada en términos del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada, en milímetros.

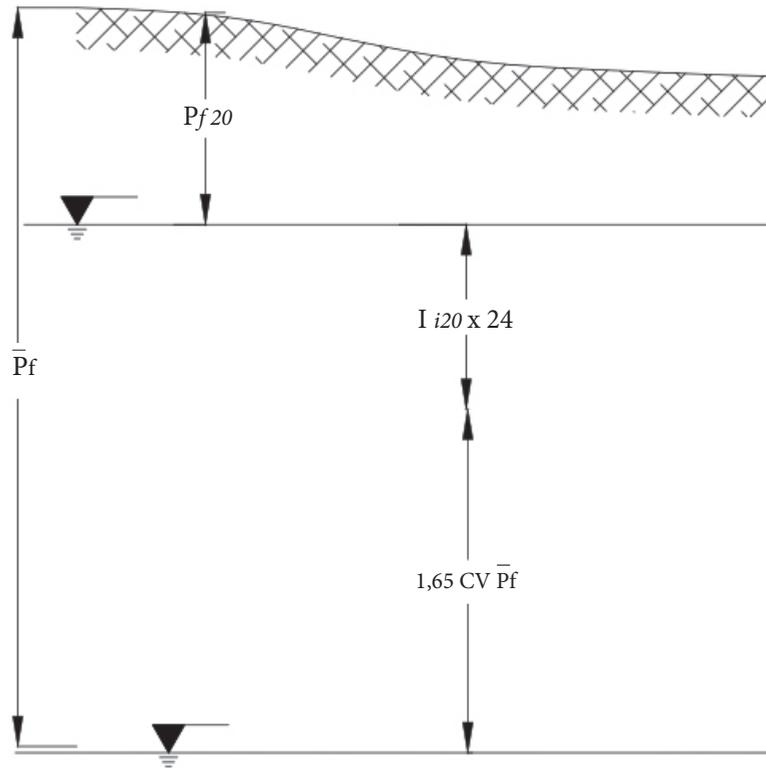


Figura 3-2. Representación de los términos utilizados para calcular la profundidad del nivel freático asociada a un periodo de retorno de 20 años.

Se supone que la serie de acumulados anuales de lluvia infiltrable sigue una distribución normal por ser suma de eventos de precipitación individuales. El valor de 1,65 corresponde, entonces, al valor Z de la distribución normal estándar asociado a una probabilidad de excedencia anual de 0,05, correspondiente a un periodo de retorno de 20 años.

I_{i20} : corresponde a la intensidad de la lluvia infiltrada diaria para un periodo de retorno de 20 años, de acuerdo con las curvas IDF del numeral 3.2.4.1 estimadas para la localidad, también en milímetros por hora, siendo 24 el número de horas al día para calcular la precipitación correspondiente acumulada a diario.

3.1.3.2 Sismo

Dado que para este nivel de análisis de la amenaza se plantea trabajar con métodos determinísticos basados en el factor de seguridad, se propone incluir el efecto de la carga sísmica como una fuerza inercial horizontal, a partir del coeficiente de aceleración horizontal en análisis de equilibrio límite pseudoestáticos.

Con todo, se requiere tener la curva de amenaza sísmica de la zona de estudio para determinar la aceleración horizontal con un periodo de retorno específico; para establecer la probabilidad de excedencia de una aceleración, se pueden utilizar curvas de amenaza sísmica disponibles en estudios regionales de amenaza sísmica o hacer un análisis simplificado de amenaza sísmica.

Curvas de amenaza sísmica disponibles

Para sitios que queden cerca (a menos de 50 km) de ciudades que cuenten con estudio de microzonificación sísmica, se puede usar la curva de amenaza sísmica definida en ese estudio.

Para zonas que no estén cerca de ciudades con estudio de microzonificación, se pueden utilizar las curvas de amenaza sísmica de las ciudades capitales definidas en el *Estudio de amenaza sísmica de Colombia* (AIS, 2009). A manera de ejemplo, se presentan a continuación las curvas de amenaza sísmica para la ciudad de Ibagué (figura 3-3).

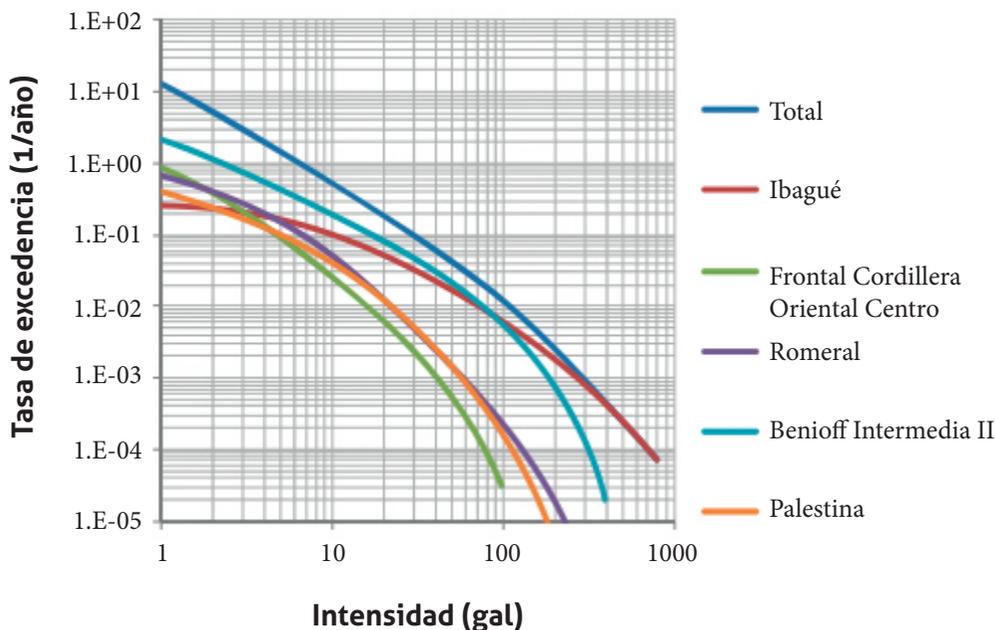


Figura 3-3. Ejemplo de curva de amenaza sísmica para una ciudad capital en Colombia.

Fuente: AIS, 2009.

Análisis simplificado de amenaza sísmica

Cuando no se puede aplicar alguna de las curvas de amenaza sísmica disponibles, es posible obtener la probabilidad de excedencia de una determinada aceleración a partir de la función de recurrencia de las fuentes sismogénicas más cercanas, utilizando las ecuaciones de atenuación sugeridas en el *Estudio de amenaza sísmica de Colombia* (AIS, 2009) para estas fuentes y el modelo de probabilidad tipo Poisson, como se describe a continuación:

Para obtener la probabilidad de excedencia de una determinada aceleración se debe contar con la siguiente información:

- Geología y tectónica regional. De la geología y descripción de las estructuras geológicas, que forman parte de la descripción de la geología regional, se identifican y describen las fuentes sismogénicas activas que pueden afectar la zona de estudio.
- Para cada fuente sismogénica se requiere su función de recurrencia, la cual se puede consultar en el informe del *Estudio de amenaza sísmica de Colombia* (AIS, 2009).
- Modelo estadístico para el análisis de probabilidad. En amenaza sísmica es común trabajar con el modelo de probabilidad tipo Poisson.
- Función de atenuación para la fuente sismogénica.

De la sismicidad histórica se puede establecer una función de recurrencia para cada fuente sismogénica, definidas en el *Estudio de amenaza sísmica de Colombia* (AIS, 2009) de la siguiente manera:

$$N_c = e^{(\lambda - \beta M)} \quad (3-3)$$

Para $M_0 < M < M_U$, donde M_0 es la magnitud mínima relevante, que la AIS (2009) tomó como 4,0, y M_U es la magnitud máxima que se puede generar en la fuente.

M es la magnitud del sismo.

N_c es el número de sismos con magnitud superior o igual a M ; este número es normalizado por unidad de longitud y por unidad de tiempo, para una fuente sismogénica lineal determinada. Para fuentes puntuales se normaliza en tiempo, y para fuentes definidas por áreas se normaliza por unidad de área y por unidad de tiempo.

Para determinar la curva de amenaza sísmica se debe definir una magnitud máxima para la fuente sismogénica, la cual se asume normalmente como la máxima magnitud reportada para la fuente más 0,5. La AIS (2009) determinó esta magnitud a partir de la longitud de las fallas con la siguiente ecuación:

$$M_U = 5,08 + 1,16 \log L_r \quad (3-4)$$

Donde

L_r es la longitud de la falla.

Con base en el modelo de probabilidad tipo Poisson, la probabilidad de excedencia (p), que define la probabilidad de que haya por lo menos un sismo con un periodo de retorno T_r , en un intervalo de tiempo L (vida útil de diseño, en este caso 50 años), se puede calcular como:

$$p = 1 - e^{-L/T_r} \quad (3-5)$$

La relación de atenuación establece la relación entre la aceleración (a) que se genera a una distancia (d) del sitio en análisis, debido a un sismo de una magnitud M . En el *Estudio de amenaza sísmica de Colombia* (AIS, 2009) se propone la ecuación de Campbell-Strike (Campbell, 1997) para sismos en la zona cortical; para la zona de subducción se propone la de Campbell-Reverse (Campbell, 1997), y para los sismos en la zona de Benioff se propone la de García et al. (2005). Estas ecuaciones tienen una forma genérica dada por la siguiente ecuación:

$$a = f(M, r, T) \quad (3-6)$$

Donde

M es la magnitud del sismo.

r la distancia hipocentral.
 T el periodo de vibración.

Para establecer la probabilidad de excedencia de una determinada aceleración (a), se deben seguir estos pasos:

1. Identificar las fuentes sismogénicas que pueden generar efectos sísmicos en la zona de estudio. Estas zonas se deben identificar por el estudio de geología.
2. Definir el alineamiento de las fuentes con base en el *Estudio de amenaza sísmica de Colombia* (AIS, 2009).
3. Determinar el punto más cercano de la fuente al sitio de estudio y, con esta distancia, definir la distancia hipocentral (r) establecida por las ecuaciones de atenuación.
4. Determinar la magnitud (M) del sismo que puede generar la aceleración (a) a la distancia (r), a partir de la ecuación de atenuación y la distancia hipocentral.
5. Determinar, de la ecuación de recurrencia para la fuente sismogénica, el número de sismos (N_c) con magnitud igual o superior a M , por unidad de longitud, por unidad de tiempo, que se han registrado en esa fuente.
6. Calcular el periodo de retorno (T_r) de la magnitud M como:

$$T_r = \frac{1}{N_c} \quad (3-7)$$

7. Calcular la probabilidad de excedencia (p) de la magnitud M con la ecuación del modelo de probabilidad tipo Poisson. La probabilidad de excedencia de la aceleración (a) es la misma probabilidad de excedencia de la magnitud de sismo que la puede generar a la distancia (r).
8. Considerar que si se tiene la influencia de más de una fuente sismogénica, se deben repetir los pasos 2 a 5 para cada una. En este caso, es posible calcular el periodo de retorno como:

$$T_r = \frac{1}{(\sum_{i=h}^{i=1}) N_{Ci}} \quad (3-8)$$

9. Determinar la probabilidad de excedencia (p) de la magnitud M con este periodo de retorno.

3.1.4 Zonificación básica de la amenaza

El análisis se hace para cada celda de una malla que cumpla con los requerimientos presentados en el capítulo 2, de acuerdo con la escala de trabajo. Para la definición de la amenaza se deben distinguir las unidades superficiales de suelo de aquellas en roca. Para las unidades en suelo se realiza un análisis de estabilidad por equilibrio límite, mientras que para las unidades de roca o macizo rocoso se debe hacer un análisis de posibilidad cinemática de movimiento.

3.1.4.1 Cálculo de la amenaza en unidades de suelo

Para la zonificación básica de amenaza se debe determinar el factor de seguridad de cada unidad de trabajo, definido por la malla y las columnas de suelo obtenidas.

El cálculo del factor de seguridad se basa en el método de equilibrio límite. En este caso, se debe aplicar la ecuación de factor de seguridad para talud infinito en cada una de las

celdas de trabajo. La ecuación del factor de seguridad en este caso se expresa de la siguiente manera:

$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \Phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha} \quad (3-9)$$

Donde

c' y Φ' son los parámetros de resistencia del suelo en la base de la columna de suelo, en término de esfuerzos efectivos.

γ es el peso unitario del suelo.

b es el ancho de la tajada (ancho de la celda).

h es la altura de suelo por encima de la superficie potencial de deslizamiento.

γ_w es el peso unitario del agua.

h_w es la altura de la lámina de agua, determinada a partir del nivel freático correspondiente a una lluvia de 20 años de periodo de retorno.

α es el ángulo de inclinación de la superficie de falla.

k es el coeficiente de aceleración horizontal para un periodo de retorno de 100 años.

Los parámetros c' y $\tan(\phi')$ deben ser los valores medios obtenidos de ensayos de laboratorio para la unidad geotécnica definida. La profundidad de la superficie de falla se toma como la profundidad del suelo o la profundidad hasta el contacto entre dos unidades de diferente comportamiento mecánico. El ángulo α se puede asumir como el ángulo de la superficie del terreno en la celda. Seguidamente se ilustran los parámetros antes indicados (figura 3-4).

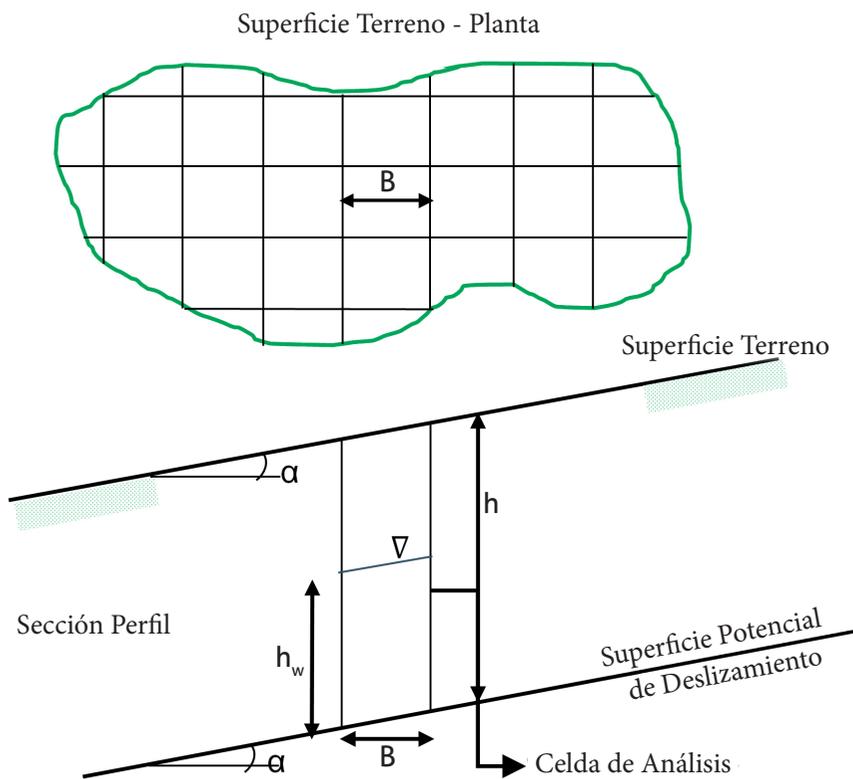


Figura 3-4. Parámetros para análisis de amenaza básica en unidades tipo suelo.

Análisis de amenaza en unidades de roca o macizos rocosos

Romana (1985) propone la clasificación de la estabilidad de taludes en roca en función del SMR (Slope Mass Rating), definido como una modificación del sistema RMR (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski (1973). El SMR es definido como:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (3-10)$$

Donde

F_1 depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y la cara del talud y se define como:

$$F_1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))^2 \quad (3-11)$$

Donde

α_j es dirección de discontinuidad

α_s es dirección del talud

Los valores que puede obtener este parámetro se encuentran entre (0,15-1,0).

F_2 depende del buzamiento de la discontinuidad en la rotura plana y se define como:

$$F_2 = \tan^2(\beta_j) \quad (3-12)$$

Donde

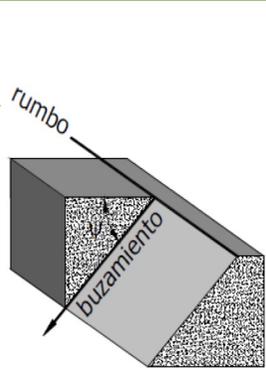
β_j es buzamiento de la discontinuidad

Los valores que puede obtener este parámetro se encuentran entre 0,15 y 1,0.

F_3 representa la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y del talud, dada por los valores propuestos por Bieniawski (1973), que se muestran a continuación (tabla 3-6).

Tabla 3-6. Efecto del rumbo y buzamiento de las discontinuidades

DIRECCIÓN DEL TALUD EN DIRECCIÓN DEL BUZAMIENTO		DIRECCIÓN DEL TALUD EN DIRECCIÓN CONTRARIA AL BUZAMIENTO	
Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento
45-90°	25-45°	45-90°	25-45°
Muy favorable	Favorable	Aceptable	Desfavorable
RUMBO PARALELO A LA DIRECCIÓN DEL TALUD		INDEPENDIENTE DEL RUMBO	
Buzamiento	Buzamiento	Buzamiento	
25-45°	25-45°	0-20°	
Aceptable	Muy desfavorable	Aceptable	



Fuente: Bieniawski, 1973.

Tabla 3-7. Valoración de F_3

RUMBO Y BUZAMIENTO ORIENTACIÓN DE LAS JUNTAS		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	ACEPTABLE	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
Puntaje	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Fundaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Bieniawski, 1973.

F_4 representa el factor de ajuste según el método de excavación y se define como se muestra a renglón seguido (tabla 3-8).

Tabla 3-8. Factor de ajuste por método de excavación

MÉTODO	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA NORMAL O MECÁNICA	VOLADURA DEFICIENTE
F_4	15	10	8	0	-8

Esta metodología permite estimar de manera cualitativa la posibilidad cinemática de un talud, a partir de parámetros que definen la calidad del macizo (tablas 3-9 y 3-10). Además, para llegar al resultado se debe contar con la siguiente información:

- Resistencia uniaxial de la roca.
- Índice de calidad de la roca (RQD).
- Espaciamiento entre discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Condición del agua subterránea.
- Orientación de las discontinuidades.

Tabla 3-9. Clases de estabilidad mediante la metodología SMR

CLASE SMR	I 110-81	II 80-61	III 60-41	IV 40-21	V 20-0
Descripción	Muy buena	Buena	Normal	Mala	Muy mala
Estabilidad	Totalmente estable	Estable	Parcialmente estable	Inestable	Totalmente inestable. Grandes roturas por planos continuos o por la masa. Reexcavación
Roturas	Ninguna	Algunos bloques	Algunas juntas o muchas cuñas	Juntas o grandes cuñas	
Tratamiento	Ninguno	Ocasional	Sistemático	Corrección	

Tabla 3-10. Relación del índice SMR con el tipo de falla para taludes

MECANISMO DE FALLA	FALLA PLANAR		FALLA DE CUÑA		FALLA POR VOLTEO	
Relación	SMR > 60	Ninguna	SMR > 75	Muy pocas	SMR > 65	Ninguna
	60 > SMR > 40	Importantes	75 > SMR > 40	Algunas	65 > SMR > 50	Menores
	40 > SMR > 15	Muy grandes	40 > SMR > 75	Muchas	50 > SMR > 30	Muy grandes

3.1.4.2 Criterios de clasificación de la amenaza

La clasificación de la amenaza a deslizamiento se define para suelos con base en el factor de seguridad y para rocas con base en el valor del SRM.

A partir del factor de seguridad y el SMR obtenido se establecen tres niveles de amenaza ante deslizamiento, clasificados como alto, medio y bajo, de acuerdo con los valores presentados seguidamente (tabla 3-11).

Tabla 3-11. Clasificación de la amenaza de un talud ante deslizamiento

NIVEL DE AMENAZA	FACTOR DE SEGURIDAD	VALOR DE SMR	COLOR EN EL MAPA
Alta	<1,1	<40	Rojo
Media	1,1-1,5	41-60	Amarillo
Baja	>1,5	>60	Verde

3.1.4.3 Zonificación y mapa de amenaza

Con base en los factores de seguridad y en los valores de SMR logrados en cada celda, así como en el criterio de clasificación de la tabla anterior (tabla 3-11), se puede representar el nivel de amenaza en la zona de estudio; así se obtiene el mapa de amenaza, en cuya leyenda se deben incluir la descripción de las características físicas de las unidades según la categoría establecida, los tipos de procesos predominantes y los posibles daños que pueden ocasionar.

Las zonas afectadas por procesos activos deben quedar categorizadas como de amenaza alta.

Finalmente, se deberá elaborar un documento técnico que contenga la metodología empleada y los resultados obtenidos.

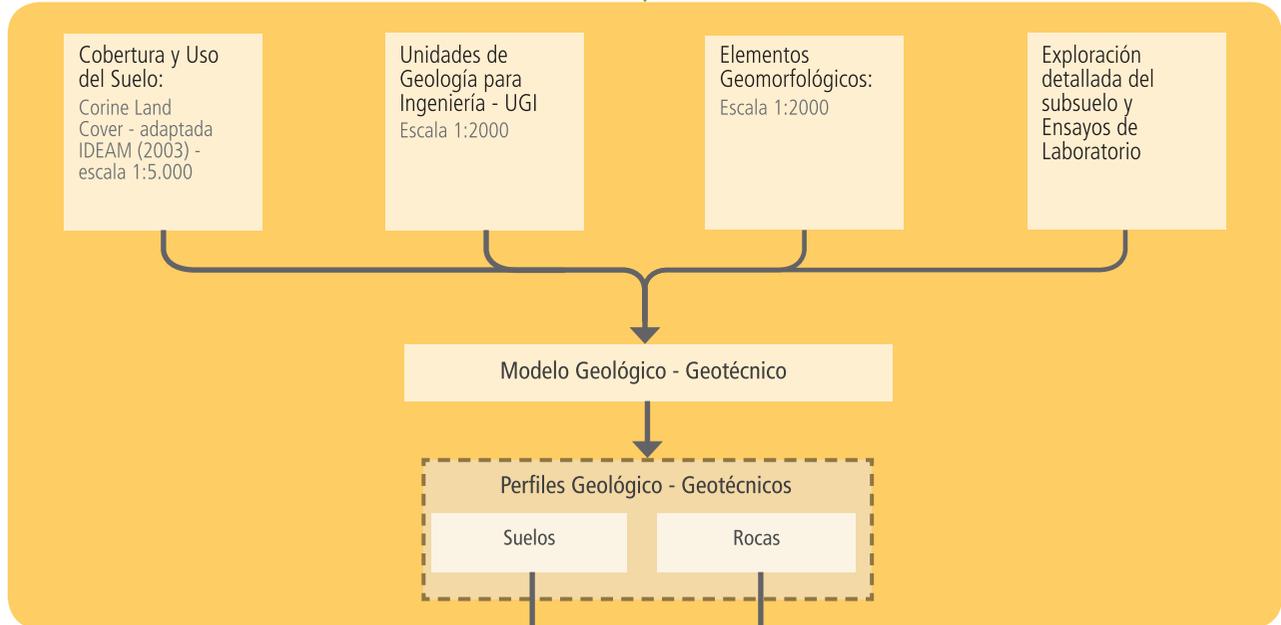
3.2 Estudios de detalle de amenaza por movimientos en masa

En la presente guía se propone un modelo probabilístico para el análisis detallado de la amenaza, escala 1:2000, de acuerdo con las actividades que se detallan en los siguientes numerales y que se presentan en el siguiente esquema metodológico (figura 3-5).

INSUMOS



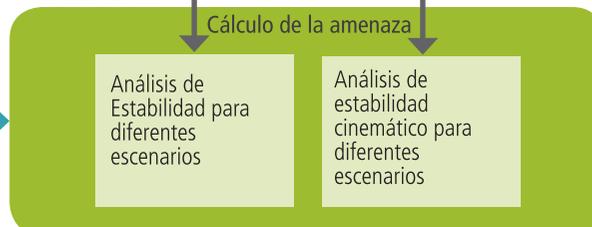
FACTORES CONDICIONANTES



FACTORES DETONANTES



MODELACIÓN



RESULTADOS

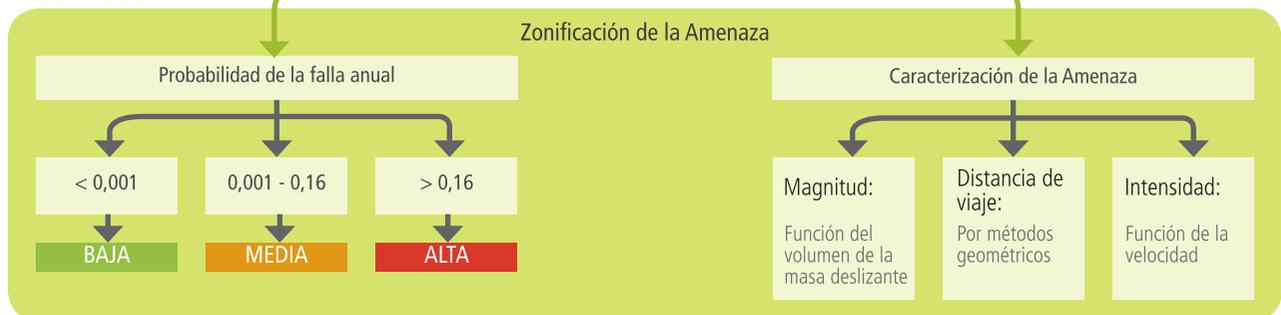


Figura 3-5. Zonificación detallada de amenaza por movimientos en masa a escala 1:2000.

Los análisis detallados de amenaza por movimientos en masa se deben desarrollar para aquellas zonas que hayan quedado clasificadas como de amenazas alta y media en el estudio básico de amenaza, de acuerdo con el procedimiento y los criterios establecidos anteriormente.

Además de los insumos requeridos para los estudios básicos de amenaza (cartografía básica digital, geología para ingeniería, elementos geomorfológicos, inventario de movimiento en masa, cobertura y uso del terreno, exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio), en el análisis detallado de la amenaza hay que incluir el análisis de secciones y factores detonantes, según la propuesta presentada más adelante.

En virtud de que los insumos temáticos relacionados con las coberturas de los factores condicionantes ya se han obtenido a escala 1:5000 y permiten la definición de un modelo geológico-geotécnico base, en los estudios detallados deben realizarse secciones de análisis en ladera que permitan refinar el modelo geológico-geotécnico base mediante el levantamiento topográfico detallado, el plan de exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio, de acuerdo con los requerimientos mínimos presentados en el numeral 3.1.1.5. En tal sentido, no se considera necesario volver a generar unidades geológicas para ingeniería, elementos geomorfológicos, cobertura y uso del suelo o inventario de movimientos en masa.

Los cambios en el uso del suelo que puedan alterar las condiciones actuales de estabilidad (por ejemplo, en las zonas de expansión y en zonas con modificaciones en la cobertura y uso del territorio) se deben tomar en cuenta para la evaluación de la amenaza.

En particular, hay que incluir en los análisis de estabilidad para la determinación de la amenaza los efectos debido a sobrecargas, cortes y cambios en las condiciones de flujos de aguas superficiales y subsuperficiales, los cuales se han de evaluar de manera particular para cada sección de análisis.

Para determinar la probabilidad de falla se deben llevar a cabo las siguientes actividades:

- Definir las zonas con condición de amenaza y riesgo.
- Definir las unidades de análisis y secciones de análisis.
- Determinar el modelo geológico-geotécnico en la sección de análisis.
- Determinar la cabeza de presión para cada escenario de análisis.
- Determinar la aceleración para cada escenario de análisis.
- Calcular la probabilidad de falla para cada escenario de análisis.
- Calcular la probabilidad de falla total.

3.2.1 Definir las zonas con condición de amenaza y riesgo

Las zonas con condición de amenaza son aquellas clasificadas como de amenazas media y alta en la zonificación básica de amenaza, al igual que aquellas en las que se hayan identificado procesos de inestabilidad en el inventario de deslizamientos y sus zonas de acumulación.

Los análisis de amenaza detallados y los análisis de riesgo se harán en aquellas zonas clasificadas como de amenaza alta, al igual que en zonas urbanizadas, edificadas o donde se identifique la existencia de edificaciones indispensables y líneas vitales.

3.2.2 Definir unidades y secciones de análisis

Con base en las celdas definidas como de amenaza alta, se deben establecer polígonos homogéneos en cuanto al nivel de amenaza, a los cuales hay que hacerles el análisis de amenaza detallada y el análisis de riesgo. Como unidad de análisis, en esta etapa se deben definir

unidades de ladera, las que se obtienen de dividir las zonas de amenaza alta a partir de las divisorias de agua y los drenajes naturales.

Para cada unidad de ladera por analizar se debe definir una sección de análisis, que generalmente es la de máxima pendiente o la que se alinea con el aspecto del talud. En la definición de estas secciones se pueden utilizar criterios basados en las características geológicas y geomorfológicas de la ladera, considerando siempre su representatividad en lo referente a la zona de amenaza.

3.2.3 Modelo geológico geotécnico para análisis detallados

Sobre la sección de análisis se genera el modelo geológico-geotécnico con base en los resultados de la topografía detallada, la exploración del subsuelo y la caracterización geotécnica.

En el modelo geológico-geotécnico se incluye la topografía de superficie a lo largo de la sección de análisis, la litología y la secuencia estratigráfica, la localización del nivel freático y la definición de los parámetros geomecánicos de las unidades geológicas identificadas.

3.2.4 Factores detonantes

La lluvia y el sismo son los factores detonantes considerados para análisis de amenaza detallados. Parte de la información requerida para dichos análisis se ha descrito para los estudios básicos, pero en este nivel de detalle se necesita un tratamiento distinto, considerando por ejemplo el planteamiento de escenarios probables o posibles basados en el tipo de evento por analizar.

3.2.4.1 Lluvia

Para analizar la ocurrencia de deslizamientos en función del régimen de precipitación de la zona de un modo confiable, hay que tener una buena comprensión del sistema hidrológico como detonante a partir del estudio de las características geomecánicas e hidrológicas del suelo susceptible de deslizamiento.

Una vez definidas las unidades y secciones para el análisis detallado de la amenaza, será necesario contar con cierta información de campo para evaluar la inestabilidad resultante de la acción hídrica relacionada con el descenso del frente húmedo, por un lado, y con la profundidad del nivel freático, por el otro. A partir del muestreo de campo se deberán obtener, además de una profundidad de tabla de agua, los siguientes parámetros y relaciones:

- Granulometría y textura del suelo.
- Porosidad (η).
- Porosidad efectiva ($\theta_e = \eta - \theta_r$, donde θ_r es el contenido de agua residual después de que ha drenado completamente el suelo).
- Relación de la conductividad hidráulica no saturada (K) para diferentes condiciones de humedad (θ).
- Relación de la cabeza de succión (ψ) para diferentes condiciones de contenido de agua (θ), esto es, curva de retención de agua en el suelo.

Adicionalmente, se deberán determinar las constantes Ψ_b y λ para el cálculo de la saturación efectiva $Se = \left[\frac{\Psi_b}{\Psi} \right]^\lambda$ que se obtienen de la curva de retención.

Desde luego, la información de precipitación es el principal insumo dentro del análisis de la lluvia como detonante de deslizamientos. Para estos análisis se requiere contar, preferiblemente, con información pluviográfica o, en su defecto, pluviométrica registrada en una estación cercana a la cabecera municipal cuyo riesgo se pretende analizar, estación que ha de cumplir con las siguientes condiciones:

- Representar adecuadamente el régimen de precipitación de la zona de interés, a juicio del hidrólogo analista.
- Estar localizada lo más cerca posible de la zona de interés. En caso de duda con respecto a la ubicación de varias estaciones próximas, se recomienda trazar polígonos de Thiessen para precisar la estación que se va a utilizar (Linsley et al., 1977).
- Procurar que la diferencia entre la cota de la cabecera del municipio y la elevación de la estación no sea mayor de 500 m.
- Contar con un registro de precipitación diaria de por lo menos quince años.

Con el registro de lluvias que se utilizará para el análisis, se debe preprocesar la información, basada en la estimación de datos faltantes, identificación de datos anómalos y análisis de consistencia de los datos (Linsley et al., 1977).

Para determinar la frecuencia de ocurrencia de posibles deslizamientos actuales o potenciales detonados por precipitación, se recurre al análisis de intensidad-duración-frecuencia (curvas IDF) para las lluvias más intensas del registro, para lo cual se debe contar con registros pluviográficos.

Como es bien conocido, las curvas IDF relacionan la intensidad de las tormentas con su duración para diferentes periodos de retorno; la ecuación básica de estas curvas tiene la siguiente forma:

$$i = \frac{c T^m}{T_d^e + f} \quad (3-13)$$

Donde

i representa la intensidad de la tormenta (mm/h).

T_d es la duración de la tormenta (min) y T es el periodo de retorno (años).

c , e , f y m son coeficientes que se deben estimar propios de cada estación pluviográfica y del periodo de retorno considerado y, por tanto, deben obtenerse para cada una de ellas.

Cuando se cuenta con información pluviográfica suficiente, se deben calcular las curvas IDF a partir de la información de la estación seleccionada para el análisis por el método detallado usual (Monsalve, 1995), hasta una duración igual a 24 horas. Las intensidades de lluvia se estimarán para periodos de retorno de 2, 33, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

En los casos en que se disponga de información pluviográfica, se deberá llevar a cabo el procedimiento usual para construir las curvas IDF, así:

- Obtener el periodo de registro más extenso posible con que se pueda contar.
- Seleccionar para cada año las cinco tormentas de mayor magnitud (mm).
- Determinar para cada año, y con los pluviogramas de las cinco tormentas, las intensidades máximas de lluvia para cada una de ellas (en mm/h) para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 360, 720 y 1440 minutos.
- Seleccionar la mayor intensidad registrada en los pluviogramas de cada año para cada duración (5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 360, 720 y 1440 minutos).
- Elaborar una tabla en la que se consignen en la primera columna los años de medición, seguida de columnas en las cuales se pongan los valores de intensidad máxima para cada una de las duraciones seleccionadas (indicadas en los encabezados de las columnas).

- Hacer un análisis de frecuencias para la serie anual correspondiente a cada duración, empleando las distribuciones de probabilidad que el especialista considere.
- Determinar, para cada duración seleccionada, los valores de intensidad máxima para 2,33, 5, 10, 20, 50 y 100 años de periodo de retorno.
- Obtener las relaciones IDF (curvas) con base en estos resultados.

Adicionalmente, utilizando todos los pluviogramas, determinar la duración típica (o promedio) de las tormentas más intensas registradas en la estación.

Solo en los casos en que no se cuente con registro pluviográfico, se sugiere estimar relaciones LDF (lámina de agua precipitada-duración-frecuencia) a partir de registros pluviométricos, más fáciles de conseguir en Colombia. A este respecto se sugiere utilizar las metodologías específicamente establecidas para Colombia, propuestas por Díaz-Granados para la obtención de curvas LDF con base en datos pluviométricos, resultado de un proceso estadístico de regionalización de curvas de duración-intensidad-frecuencia (Vargas y Díaz-Granados, 1998; Díaz-Granados y Puente, 2008).

En esta guía metodológica se utiliza el término “lámina (L)” para hacer referencia a la profundidad de precipitación, de tal modo que lo que se conoce como curvas profundidad-duración-frecuencia (PDF), aquí se llamará LDF. La profundidad de precipitación (L) es el producto de la intensidad (I) por la duración (D) del evento de lluvia.

El procedimiento para la obtención de las curvas LDF es el siguiente:

1. Obtener información diaria de precipitación en la estación considerada, procurando que esta tenga un registro suficientemente largo (más de quince años).
2. Calcular la precipitación media anual multianual (mm/año), el número promedio de días con lluvia al año, y establecer la elevación de la estación (msnm).
3. Determinar la correspondiente serie anual de precipitación máxima diaria, expresándola en mm/día.
4. Ajustar la distribución Gumbel con momentos ponderados por probabilidad (MPP), calcular los respectivos valores de $M_{0\text{diario}}$ y $M_{1\text{diario}}$ con las ecuaciones mostradas a continuación, y calcular el valor de (M_1/M_0) diario.

$$M_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad M_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i^{n-1}}{n-1} \quad (3-14)$$

Donde

x_i corresponde a la precipitación diaria máxima anual y n al número de años considerados.

5. Definir el conjunto de valores de duraciones (t) de interés, así: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 240, 720 y 1440 minutos.
6. Calcular, para cada duración superior o igual a 1 hora, los correspondientes valores de los coeficientes k_1 , k_2 , k_3 y k_4 , mediante las siguientes ecuaciones y la tabla que aparece posteriormente (tabla 3-12):

$$k_1 = a_1 + b_1 t + c_1 t \ln(t) + d_1 t^{0.5} \ln(t) + e_1 t^{-1.5} \quad (3-15)$$

$$k_2 = a_2 + b_2 t \ln(t) + c_2 t^{2.5} + d_2 t^{0.5} \ln(t) \quad (3-16)$$

$$k_3 = a_3 + b_3 c_3 \ln(t) + d_3 t^{-0.5} + e_3 t^{-1.5} \quad (3-17)$$

$$k_4 = a_4 + b_4 t + c_4 t^{1.5} + d_4 t^2 + e_4 e^{-t} \quad (3-18)$$

Tabla 3-12. Valores de los coeficientes k_1 a k_4

COEFICIENTE	SUBÍNDICE			
	1	2	3	4
A	-761,087	0,22288	16,809	-0,0129
B	741,947	-0,07566	0,234	0,004169
C	-103,788	0,0005667	-5,8561	-0,001365
D	-586,892	0,32844	-17,8728	0,0001313
E	38,82	-	2,3229	0,014595

Fuente: Díaz-Granados y Puente, 2006.

7. Para cada valor de duración mayor o igual a una hora, calcular los valores de M_{0t} usando la ecuación

$$M_{0t} = k_1 + k_2 M_{0diario} + k_3 (P_A/N) + k_4 E \quad (3-19)$$

Para duraciones menores de una hora, utilizar la siguiente ecuación para estimar M_{0t} a partir del valor previamente calculado de M_{01hr} :

$$(M_{0t}/M_{01hr}) = 0,3027 \ln(t) - 0,2806 \quad (3-20)$$

8. Para cada duración t calcular $M_{1t} = (M_1/M_0)_{diario} \times M_{0t}$, usando el valor de $(M_1/M_0)_{diario}$.
 9. Con base en las ecuaciones descritas, estimar la curva de frecuencia de profundidad de precipitación máxima para una duración y valores seleccionados del periodo de retorno T :

$$X_T = m - a \ln [-\ln(1-1/T)] \quad (3-21)$$

Donde

$$m = M_0 - \varepsilon a$$

$$a = (M_0 - 2M_1)/\ln(2)$$

$$\varepsilon = 0,5772$$

10. Conformar las curvas LDF para la estación.

En los casos en que no se cuente con información de ningún tipo, se recomienda acudir a información diaria generada a partir de satélite, algunas de cuyas fuentes son:

- International Precipitation Group (IPG).
- Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM).
- Climate Research Unit (CRU).
- Global Precipitation Climatology Center (GPCC).
- Megha Tropiques.

Por otra parte, se tendrá que determinar la cuenca de drenaje local para desarrollar los análisis detallados de inestabilidad del terreno que tengan como factor detonante la precipitación. Dicha cuenca se deberá definir a partir de un punto de concentración, desde el cual parte la divisoria de aguas y al que ha de llegar su trazado, localizado en la parte más baja del deslizamiento, esto es, donde se deposite con predilección el material desplazado, teniendo en cuenta que la línea divisoria de aguas no corte ningún cauce de la red de drenaje, con excepción del punto de concentración, y que su trazado siempre corte las curvas de nivel

perpendicularmente, pasando por los puntos de mayor cota de la zona. Para este propósito podrá emplearse un MDT como herramienta.

Efecto de la lluvia en deslizamientos superficiales

Se consideran deslizamientos superficiales aquellos en los cuales el plano deslizante no tiene una profundidad apreciable. Se generan fundamentalmente por el flujo subsuperficial en el suelo más o menos paralelo a la superficie de la ladera. Dado que estos eventos ocurren por precipitación acumulada a corto plazo, para el análisis de este tipo de deslizamientos se debe utilizar la información suministrada por las curvas intensidad-duración-frecuencia (curvas IDF), atrás mencionadas.

Así mismo, el procedimiento sugerido para analizar la incidencia de la lluvia sobre la estabilidad de la ladera en deslizamientos superficiales a partir de información pluviográfica es el siguiente:

- Contar con las curvas IDF para los periodos de retorno estipulados y con la posición del nivel freático identificado en la exploración de campo detallada.
- Calcular, de acuerdo con Pradel y Raad (1993), la intensidad mínima constante con una duración () suficiente para que el suelo alcance la saturación hasta una profundidad del frente húmedo :

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_w} \left[z_w - \Psi \ln \left(\frac{\Psi + z_w}{\Psi} \right) \right] \left(\frac{z_w + \Psi}{z_w} \right) \quad (3-22)$$

Donde

μ corresponde a la saturación efectiva calculada como la diferencia entre el contenido volumétrico de agua antes y después del frente húmedo (que varía de 10 al 30 %).

Ψ corresponde a la cabeza de succión del frente húmedo, cuyos valores típicos van desde 80 cm para materiales gruesos hasta 140 cm para arcillas.

Z_w corresponde a la profundidad del frente húmedo. Dicha intensidad mínima se debe calcular para diferentes duraciones de tormenta y así configurar una curva Z_w vs. duración para una profundidad de frente húmedo dado; de esta manera, se deben realizar curvas para distintas profundidades de frente húmedo.

Sobre la gráfica de las curvas IDF se traza la curva I_{min} , de tal modo que dentro de la gráfica se podrán identificar diferentes duraciones e intensidades de tormenta, asociadas a periodos de retorno, capaces de saturar el suelo a una profundidad Z_w .

- Ubicar, para una duración igual a la duración típica de la tormenta en la zona de análisis, la intersección entre la curva I_{min} (para cada profundidad de frente húmedo) y una curva IDF, y considerar el periodo de retorno de esta curva IDF como el periodo de recurrencia correspondiente de la profundidad del frente húmedo (Z_w).
- Calcular los periodos de retorno para las profundidades de frente húmedo consideradas y emplear estos periodos de retorno dentro del análisis de amenaza de deslizamientos superficiales a escala detallada.

Cuando no se cuenta con información pluviográfica, pero sí con un registro de precipitación en 24 horas no menor de quince años, se deben emplear las curvas LDF obtenidas mediante la aplicación del método de Díaz-Granados o uno similar (indicado anteriormente), hasta una duración igual a 24 horas. La estimación de las LDF se hará para periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

El procedimiento para el análisis de deslizamientos superficiales con información pluviométrica es el siguiente:

- Contar con las curvas LDF para los periodos de retorno estipulados y con la posición del nivel freático determinada en la exploración de campo.
- Estimar la profundidad de la lluvia P_{min} en 24 horas, según la ecuación de Pradel y Raad (1993), para profundidades de frente húmedo (Z_w) supuestos, y superponer estos resultados sobre las curvas LDF:

$$P_{min} = I_{min} * T_w = I_{min} * 24 \quad (3-23)$$

- Obtener los valores de precipitación diaria superior o igual al P_{min} en 24 horas y determinar su media, utilizando la totalidad del registro de precipitación. En el caso de que no se registren valores superiores, a P_{min} se deberá suponer este valor como el promedio.
- Ubicar, sobre las curvas LDF, el valor medio de la precipitación diaria del registro correspondiente a los datos seleccionados en el paso anterior, e identificar el periodo de retorno correspondiente según su posición relativa respecto a las curvas LDF.
- Asignar a la profundidad Z_w supuesta el periodo de retorno así obtenido, y emplear estos valores (Z_w y T) en el análisis de amenaza por deslizamientos superficiales a escala detallada.

Efecto de la lluvia en deslizamientos profundos

Los deslizamientos profundos son generados en la mayoría de los casos por la presión de poros positiva en el plano deslizante, inducida por el ascenso del nivel freático en el subsuelo. Estos tipos de deslizamiento requieren una gran cantidad de agua para alcanzar las condiciones detonantes en el suelo. Por tal motivo, se considera que el detonante de esta clase de deslizamientos es la cantidad de agua acumulada proveniente de periodos de lluvia previos, en un plazo mucho mayor que en el caso de los superficiales.

Cuando se cuenta con información suficiente según el enfoque aquí propuesto, la metodología consiste en establecer la variabilidad anual del nivel freático en función de la cantidad de lluvia infiltrada anual. Para esto se requiere disponer de información de eventos de deslizamiento causados por lluvia que cuenten con buena información pluviométrica asociada. Específicamente, para realizar estas relaciones, el procedimiento general que hay que seguir consiste en determinar la precipitación infiltrada para cada día con precipitación, considerando la condición de humedad antecedente del suelo, de acuerdo con el método del SCS ya citado.

Entre los insumos se debe contar con:

- Delimitación de la subcuenca local sobre un modelo digital de terreno (MDT).
- Clasificación hidrológica de suelos según el SCS, a partir de la información de la cobertura y el uso del suelo.
- Registros de precipitación diaria de una estación próxima para un periodo no menor de quince años.
- Profundidad del nivel freático determinado en la exploración geotécnica de campo. En los casos en que no pueda identificarse una profundidad de la tabla de agua, se

considerará, según el criterio del experto en geotecnia, la profundidad de la superficie de falla, se asignará esta profundidad al valor medido del nivel freático y se analizará la variabilidad anual de la tabla de agua, de acuerdo con lo descrito a continuación:

1. Asumir que la posición del nivel freático medido en campo corresponde a su profundidad promedio, siempre y cuando se identifique una profundidad de este; de lo contrario, hay que utilizar la misma profundidad de la superficie de falla.
2. Estimar el número de curva del SCS (CN) representativo de la subcuenca y para las condiciones antecedentes de humedad II, de acuerdo con los valores de la tabla 3-5, en la que se indican valores de número de curva en función del grupo hidrológico del suelo y de la cobertura y uso del suelo.
3. Obtener la precipitación acumulada en cinco días anteriores a cada fecha considerada en el análisis y, con ello, identificar las condiciones antecedentes de humedad para cada día con precipitación.
4. Recalcular, si es necesario, el valor de CN para cada día con precipitación en función de las condiciones antecedentes de humedad I o III y calcular la precipitación infiltrada diaria (P_i), teniendo en cuenta la adaptación del método del SCS descrita anteriormente.

$$P_i = I_a + F_a \quad (3-24)$$

5. Calcular la precipitación infiltrada anual (acumulada) para cada uno de los años del registro.
6. Calcular la precipitación infiltrada media anual multianual, su desviación estándar y su coeficiente de variación.
7. Asumir, para el análisis de amenaza, que el nivel freático de la subcuenca local tiene una variabilidad anual alrededor de la profundidad del nivel freático medio asumido igual a la de la precipitación infiltrable acumulada.

Los resultados de estos procedimientos establecidos para deslizamientos superficiales y profundos constituyen un insumo básico para los análisis de inestabilidad de las laderas que se desarrollan en los estudios de amenaza.

3.4.4.2 Sismo

En los análisis, el efecto de la fuerza inercial sísmica se incluye como una aceleración horizontal para diferentes periodos de retorno.

La determinación de la aceleración de un periodo de retorno dado se debe hacer a partir de curvas de amenaza sísmica disponibles o de un análisis de amenazas sísmica simplificado (numeral 3.1.3.2).

3.2.5 Escenarios de amenaza

Para cada escenario de análisis se determina la variación de la posición del nivel freático con base en la respuesta hidrológica de la ladera. Para considerar el efecto de la lluvia en la estabilidad se deben tomar en cuenta lluvias con periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Cada una de estas lluvias tiene una probabilidad de ocurrencia en función del periodo de retorno, que se calcula como:

$$p_{II} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^L\right) \quad (3-25)$$

Donde

T_r es retorno de lluvia en años.

L es periodo de exposición, en este caso 50 años.

Dado que se va a trabajar con el método de equilibrio límite, la carga sísmica entra en el análisis como una fuerza inercial horizontal cuya magnitud es el peso de la masa deslizada por el coeficiente de aceleración horizontal para cada escenario de análisis, los cuales se obtienen como se explicó anteriormente.

Para considerar el efecto de la carga sísmica en la estabilidad, se deben tener en cuenta sismos con periodos de retorno de 31, 225 y 475 años.

La probabilidad de excedencia de un sismo (p_s) con un determinado periodo de retorno está dada por

$$p_s = 1 - e^{-L/T_r} \quad (3-26)$$

3.2.6 Zonificación detallada de la amenaza

La zonificación de amenaza a nivel detallado se realiza a partir del cálculo de probabilidades de falla, como se explica a continuación.

3.2.6.1 Cálculo de la probabilidad de falla

La amenaza por deslizamientos en la presente guía se define en términos probabilísticos como la probabilidad anual de falla del talud, la cual se puede obtener al determinar la probabilidad anual de falla considerando la aceleración del terreno por eventos sísmicos como una variable aleatoria y efectuando un análisis por confiabilidad. En este caso, la probabilidad de falla se define como la probabilidad anual de que el factor de seguridad sea inferior o igual a 1,0, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$p_f = p(FS \leq 1,0) \quad (3-27)$$

Considerando el factor de seguridad como una función aleatoria, en términos de variables aleatorias, se puede determinar la probabilidad de falla como la probabilidad anual de que el factor de seguridad sea inferior o igual a 1,0, tomando en cuenta la variabilidad de los parámetros del suelo para varios escenarios de amenaza definidos como la combinación de diferentes lluvias y sismos de análisis.

Si se considera un escenario de lluvia y sismo, la probabilidad de falla se obtiene como la probabilidad de que el factor de seguridad sea inferior o igual a 1,0, dada la lluvia y dado el sismo del escenario determinado, multiplicado por la probabilidad de que se produzca la lluvia por la probabilidad de que ocurra el sismo, lo que se expresa así:

$$p_f = p(FS \leq 1,0 | h_w | k) p(h_w) p(k) \quad (3-28)$$

En resumen, los pasos que hay que seguir para hacer un análisis por confiabilidad son (Baecher & Christian, 2003):

- Establecer el modelo para calcular el margen de seguridad, factor de seguridad u otra forma de medir la función de comportamiento.
- Estimar los descriptores estadísticos de las variables aleatorias que forman parte de la función de comportamiento. Estos descriptores son la media, desviación estándar, coeficiente de asimetría y coeficiente de correlación.
- Calcular los momentos estadísticos del factor de seguridad.
- Calcular el índice de confiabilidad.
- Calcular la probabilidad de falla.

Funciones de comportamiento

La función de comportamiento que se utiliza en este análisis es la ecuación del factor de seguridad por equilibrio límite. A continuación se presentan las ecuaciones para los tipos de mecanismos de falla incluidos en el análisis.

Deslizamientos en suelo

Para un mecanismo de falla traslacional, el factor de seguridad para una lluvia dada que genera una cabeza de presión h_w , y un sismo que genera una aceleración horizontal kg , se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{c}{\gamma h} \frac{\sec \alpha}{\sin \alpha + k \cos \alpha} + \left[\frac{\cos \alpha - k \sin \alpha}{\sin \alpha + k \cos \alpha} - \frac{\gamma_w h_w \sec \alpha}{\gamma h} \right] \tan \varphi \quad (3-29)$$

Para mecanismos de falla rotacional se debe obtener un mecanismo de falla crítico, que será aquel que dé menor factor de seguridad en condición actual.

Para este mecanismo de falla, la ecuación para calcular el factor de seguridad depende del método de análisis empleado. Se recomienda utilizar los métodos de Bishop simplificado y Morgenstern & Price.

Deslizamientos en roca

Falla planar

Para la falla planar, el factor de seguridad se puede obtener como:

$$FS = \frac{c' L + [W \cos \psi_p - kW \sin \psi_p - U - V \sin \psi_p \tan \varphi']}{W \sin \psi_p + kW \cos \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (3-30)$$

Donde

Los términos corresponden a los de la figura 3-3. El peso de la cuña en falla se puede obtener como:

$$W = \gamma [(1 - \cot \psi_f \tan \psi_p)(bH + 1/2 \cot \psi_f) + 1/2 b^2 (\tan \psi_s - \tan \psi_p)] \quad (3-31)$$

$$U = 1/2 \gamma_w z_w (H - b \tan \psi_s - z) \csc \psi_p \quad (3-32)$$

$$V = 1/2 \gamma_w z_w^2 \quad (3-33)$$

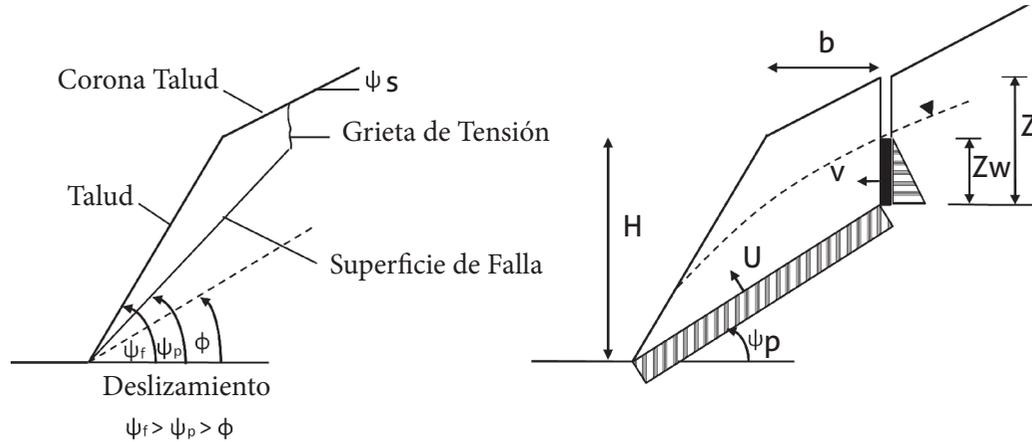


Figura 3-6. Mecanismo de falla planar en roca.

Fuente: Adaptada de Wyllie & Mah, 2004.

Falla en cuña

La ecuación para determinar el factor de seguridad, considerando falla en cuña, es:

$$FS = \frac{\sin\beta}{\sin(\xi/2)} \frac{(\cos\psi_i - k \sin\psi_i)}{(\sin\psi_i + k \cos\psi_i)} \tan\phi' \quad (3-34)$$

En condición pseudoestática se puede encontrar:

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan\phi'}{W(\sin\phi_i + k \cos\phi_i)} \quad (3-35)$$

$$R_A \sin(\beta - 1/2 \xi) = R_B \sin(\beta + 1/2 \xi) \quad (3-36)$$

$$R_A \cos(\beta - 1/2 \xi) + R_B \cos(\beta + 1/2 \xi) = W \cos\phi_i - kW \sin\phi_i \quad (3-37)$$

$$\phi_i = \tan\phi_A \cos(\alpha_A - \alpha_i) = \tan\phi_B \cos(\alpha_B - \alpha_i) \quad (3-38)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{\tan\psi_A \cos\alpha_A - \tan\psi_B \cos\alpha_B}{\tan\psi_B \sin\alpha_B - \tan\psi_A \sin\alpha_A} \right) \quad (3-39)$$

$$R_A + R_B = \frac{(W \cos\psi_i - kW \sin\psi_i \sin\beta)}{\sin(\xi/2)} \quad (3-40)$$

Entonces

$$FS = \frac{\sin\beta (\cos\phi_i - k \sin\phi_i)}{\sin(\xi/2) (\sin\phi_i + k \cos\phi_i)} \tan\phi' \quad (3-41)$$

Donde

α_A y α_B son la dirección de buzamiento de los planos A y B, que forman la cuña. ψ_A y ψ_B son los buzamientos de los planos. R_A y R_B son las fuerzas de reacción normales sobre los planos

A y B, las cuales se pueden encontrar resolviendo sumatoria de fuerzas en sentido normal y paralelo a la dirección de la línea de intersección entre los dos planos. Los ángulos β y ξ se definen más adelante (figura 3.7a), y se pueden obtener por medio de una red estereográfica (figura 3.7b).

En este caso la aceleración crítica se puede obtener iterando el factor de seguridad para diferentes aceleraciones.

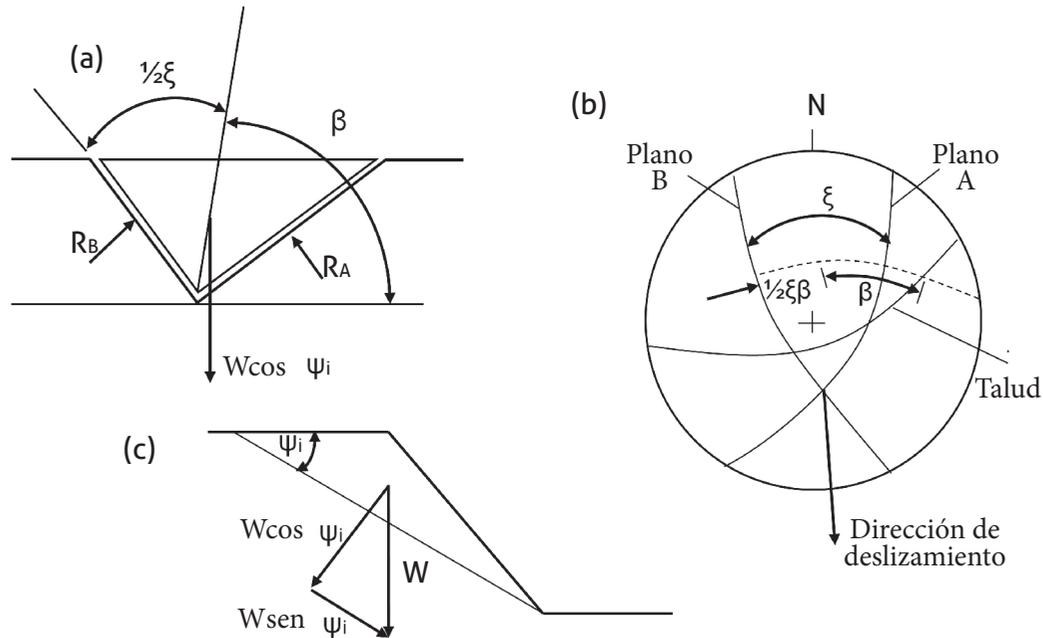


Figura 3-7. Mecanismo de falla en cuña en roca.

Fuente: Wyllie & Mah, 2004..

Las variables que pueden tomarse como aleatorias en el análisis son los parámetros geomecánicos del suelo (γ , c' , ϕ') y los factores detonantes, como la posición del nivel freático o la cabeza de presión y la carga sísmica, esta última expresada en términos del coeficiente de aceleración horizontal. El tratamiento estadístico de los factores detonantes debe permitir una aproximación confiable a los descriptores estadísticos de las variables aleatorias consideradas, con procedimientos como los presentados por Baecher & Christian (2003).

3.2.6.2 Probabilidad de falla y probabilidad de falla total

La probabilidad de que el factor de seguridad sea menor que 1,0 se calcula a través del índice de confiabilidad (β) como:

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (3-42)$$

Donde

$\Phi(\beta)$ es la confiabilidad, que es la probabilidad de no falla, que en este caso se calcula como la función inversa de la función Z (función de probabilidad acumulada normal estándar), calculada para un valor igual a β , el cual a su vez se obtiene como:

$$\beta = \frac{(\mu_{FS} - 1, 0)}{\sigma_{FS}} \quad (3-43)$$

En esta ecuación, μ_{FS} y σ_{FS} son la media y la desviación estándar del factor de seguridad, que se pueden obtener aplicando el método de los estimativos puntuales (Baecher & Christian, 2003), el cual se describe brevemente a continuación.

La idea básica del método de estimativos puntuales consiste en sustituir las distribuciones probabilísticas de las variables aleatorias continuas por distribuciones discretas equivalentes, las cuales tendrán los mismos tres primeros momentos centrales. Luego se calculan la media, desviación estándar y asimetría de la función de comportamiento.

Debe considerarse una función de comportamiento Y , dependiente de n variables aleatorias X_i . Dichas variables son simétricas y están correlacionadas. El proceso escoge 2^n puntos, de tal manera que el valor de cada variable está una desviación estándar por arriba y por debajo de la media. Estos puntos se conocen como puntos de muestreo. Al conocer el valor medio μ_{X_i} y la desviación estándar σ_{X_i} de las variables aleatorias, la ubicación de los puntos de muestreo x_{i+} y x_{i-} se puede calcular así:

$$x_{i+} = \mu_{X_i} + \xi_{X_i} + \sigma_{X_i} \quad (3-44)$$

$$x_{i-} = \mu_{X_i} + \xi_{X_i} - \sigma_{X_i} \quad (3-45)$$

Donde

Las desviaciones estándar unitarias $\xi_{X_{i+}}$ y $\xi_{X_{i-}}$ dependen de los coeficientes de asimetría v_{X_i} de las variables aleatorias. Estas se calculan mediante:

$$\xi_{X_{i+}} = \frac{v_{X_i}}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{v_{X_i}}{2}\right)^2} \quad (3-46)$$

$$\xi_{X_{i-}} = \frac{v_{X_i}}{2} - \sqrt{1 + \left(\frac{v_{X_i}}{2}\right)^2} \quad (3-47)$$

Ahora es posible calcular el valor de la función de comportamiento empleando los puntos de muestreo o estimativos x_{i+} y x_{i-} . Para n variables aleatorias, la función se evalúa en 2^n puntos.

Los pesos P_p , conocidos también como concentraciones de probabilidad, se deben calcular para tomar en cuenta la contribución de la correlación entre las variables aleatorias. Puesto que una función de densidad de probabilidad tiene un área unitaria, los pesos también deben sumar uno y ser positivos. Los pesos se obtienen mediante diferentes expresiones, dependiendo del número de variables y su correlación. En la figura siguiente se puede observar la función de densidad de probabilidad resultante de evaluar la función de comportamiento en cada uno de los puntos de muestreo. Dado que la distribución es asimétrica, los pesos asignados a cada una de las evaluaciones tienen diferentes valores (figura 3-8).

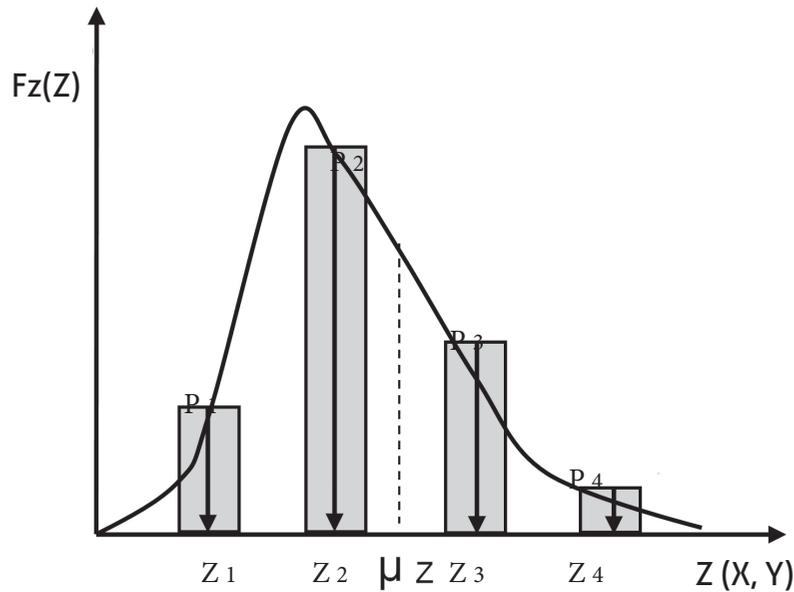


Figura 3-8. Representación de los pesos asignados a los resultados de la función de comportamiento.

Fuente: Tomado de Russelli, 2008.

Cuando existen n variables aleatorias, los pesos se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$P_{(s_1 s_2 \dots s_n)} = \frac{1}{2^n} [1 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (s_i)(s_j) \rho_{ij}] \quad (3-48)$$

Donde

s es +1 cuando el valor de la variable es una desviación estándar por arriba de la media. Será -1 cuando esté por debajo de la media. Finalmente, los tres primeros momentos centrales de la función de comportamiento se calculan de la siguiente manera:

$$\mu_{Y(X_i)} = \sum_{i=1}^{2^n} P_i Y(X_i = x_i) \quad (3-49)$$

$$\sigma^2_{Y(X_i)} = \sum_{i=1}^{2^n} P_i (Y(X_i = x_i) - \mu_{Y(X_i)})^2 \quad (3-50)$$

$$\nu_{Y(X_i)} = \frac{1}{\sigma^3_{Y(X_i)}} \sum_{i=1}^{2^n} P_i (Y(X_i = x_i) - \mu_{Y(X_i)})^3 \quad (3-51)$$

La probabilidad total de falla combinando los escenarios de análisis se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$p_{ft} = 1 - (1 - p_{f1})(1 - p_{f2}) \dots (1 - p_{fn}) \quad (3-52)$$

Donde

p_{ft} es la probabilidad total de falla.

p_{fi} es la probabilidad de falla para el escenario i . Este escenario se define por la combinación de lluvia y sismos que se estableció en el numeral 3.2.4.

3.2.6.3 Criterios de clasificación de la amenaza en estudios detallados

El nivel de amenaza se puede clasificar en alto, medio y bajo, con base en la probabilidad anual de falla (tabla 3-13).

Con fundamento en los valores de probabilidad de falla obtenidos para cada zona de análisis, representada por la sección de análisis definida y con los criterios de la tabla siguiente (tabla 3-13), se puede espacializar el nivel de amenaza en la zona de estudio y obtener el mapa de amenaza.

El informe técnico debe contener la metodología empleada y los resultados obtenidos.

Tabla 3-13. Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la probabilidad anual de falla

NIVEL DE AMENAZA	PROBABILIDAD ANUAL DE FALLA
Baja	<0,001
Media	0,001-0,16
Alta	>0,16

3.2.6.4 Caracterización de la amenaza

En la evaluación del riesgo por movimientos en masa, es fundamental predecir el modo de falla de las laderas y cuantificar el desplazamiento de la masa, incluyendo la distancia de viaje y la velocidad (Hung et al., 2005). Entre los parámetros que definen la magnitud de los movimientos en masa se deben incluir todos aquellos que describan su capacidad destructiva (AGS, 2007b).

Tabla 3-14. Parámetros para definir magnitud de los movimientos en masa

TIPO DE PROCESO	PARÁMETROS QUE DEFINEN MAGNITUD
Velocidad y volumen movilizado	Deslizamientos
Energía cinética	Caídas
Desplazamientos totales	Deslizamientos, movimientos lentos
Desplazamientos diferenciales	Movimientos lentos
Caudal pico por ancho (m ³ /m/s)	Flujos

Fuente: AGS, 2007b.

AGS (2007b) incluye también otros posibles parámetros, como:

- El espesor (profundidad) de la masa movilizada.
- El espesor de la masa depositada.
- El espesor del material erosionado.

Existen diversas técnicas empíricas y analíticas para determinar estos parámetros de magnitud de un movimiento en masa. Sin embargo, dadas la variabilidad de las características de los materiales y las posibilidades de falla, la determinación de estos parámetros suele llevar consigo errores; para disminuir y conceptualizar esos errores, se recomienda

emplear varias metodologías de evaluación. A continuación se presentan algunas de las metodologías existentes para calcular la distancia de viaje y la velocidad de desplazamiento de un movimiento en masa, presentadas por Hungr et al. (2005).

Para efectos de esta guía, la amenaza se caracteriza a un nivel intermedio (AGS, 2007b), de modo que la magnitud se evaluará por medio del parámetro volumen de la masa deslizada. La distancia de viaje se determinará mediante métodos geométricos y la intensidad se definirá con base en la velocidad adquirida por la masa fallada. Si el profesional que desarrolla el estudio de evaluación de riesgo por movimientos en masa tiene las herramientas, los datos y la experiencia necesarios para hacer evaluaciones de los parámetros de caracterización de los movimientos en masa a una escala detallada, estos se podrán utilizar para evaluar el riesgo; los métodos a una escala básica no podrán ser insumos para la evaluación del riesgo de manera cuantitativa con la metodología que se presenta en esta guía.

Magnitud

En esta guía se define como parámetro de magnitud el volumen de la masa potencialmente inestable. Para determinar el valor del volumen se deberá contar con un mapa en planta, en el que se detalle el contorno del movimiento potencial, y un perfil donde se pueda estimar el espesor de la masa comprometida en el movimiento. Así, el volumen se calculará de acuerdo con la siguiente ecuación y las definiciones de la figura siguiente (figura 3-9).

$$V = \left(\frac{1}{6} \pi D_r W_r L_r \right) f_{exp} \quad (3-53)$$

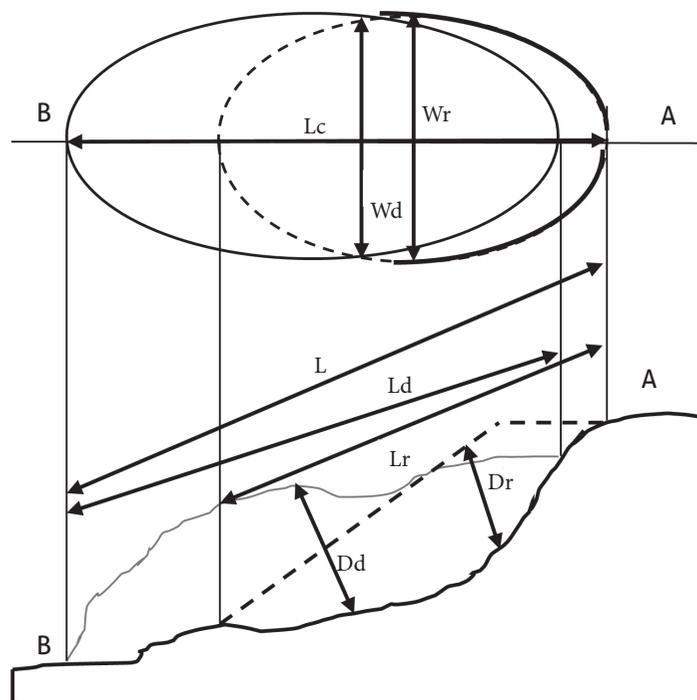


Figura 3-9. Determinación del volumen de un deslizamiento.

Fuente: IAEG, 1990.

Donde

V es el volumen del deslizamiento, D_r es la profundidad máxima de la superficie de falla, W_r es el ancho máximo de la superficie de falla, L_r es la longitud de la superficie de falla y f_{exp} es un factor de expansión del material deslizado; generalmente este factor es de 1,25 a 1,3 hasta 1,7, dependiendo de los materiales comprometidos.

Distancia de viaje

Los métodos geométricos se basan en la hipótesis de dependencia de la distancia de viaje a la configuración geométrica de la ladera (los parámetros considerados aparecen en la figura 3-10). Así, se han propuesto diversas correlaciones de tales variables para determinar el valor de la distancia de viaje, L . A continuación se presentan algunos resultados de las regresiones reportadas en Hungr et al. (2005) (tablas 3-15 a 3-18).

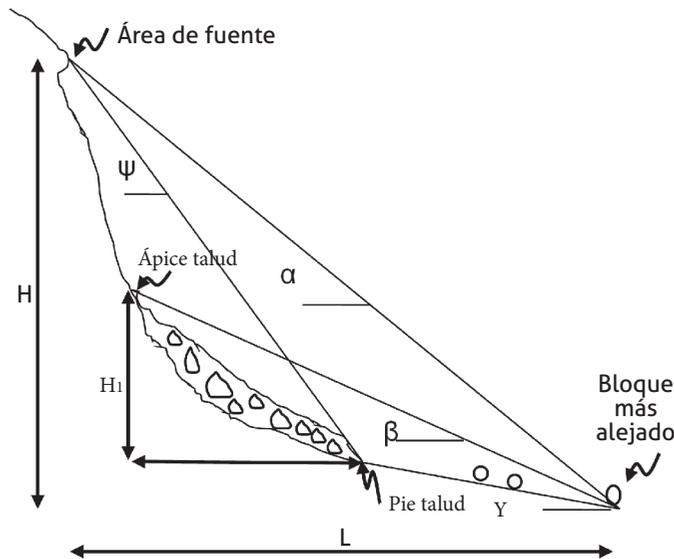


Figura 3-10. Variables geométricas para definir la distancia de viaje de un deslizamiento.

Fuente: Hungr et al., 2005.

Tabla 3-15. Ecuaciones para determinar la distancia de viaje, obtenidas en Hong Kong

VARIABLE DEPENDIENTE		ECUACIÓN
Corte talud	LCI	$\text{Log } L = 0,062 + 0,965 \text{ Log } H - 0,558 \text{ Log } (\tan \delta)$
	Promedio	$\text{Log } L = 0,109 + 1,010 \text{ Log } H - 0,506 \text{ Log } (\tan \delta)$
	UCI	$\text{Log } L = 0,156 + 1,055 \text{ Log } H - 0,454 \text{ Log } (\tan \delta)$
Relleno talud	LCI	$\text{Log } L = 0,269 + 0,325 \text{ Log } H + 0,166 \text{ Log } (V/W)$
	Promedio	$\text{Log } L = 0,453 + 0,547 \text{ Log } H + 0,305 \text{ Log } (V/W)$
	UCI	$\text{Log } L = 0,693 + 0,768 \text{ Log } H + 0,443 \text{ Log } (V/W)$

(pasa...)

(viene...)

VARIABLE DEPENDIENTE		ECUACIÓN
Muro de contención	LCI	$\text{Log L} = 0,037 + 0,350 \text{ Log H} + 0,108 \text{ Log (V/W)}$
	Promedio	$\text{Log L} = 0,178 + 0,587 \text{ Log H} + 0,309 \text{ Log (V/W)}$
	UCI	$\text{Log L} = 0,319 + 0,825 \text{ Log H} + 0,150 \text{ Log (V/W)}$
Caída de roca	LCI	$\text{Log L} = 0,041 + 0,515 \text{ Log H} - 0,629 \text{ Log (tan } \delta)$
	Promedio	$\text{Log L} = 0,253 + 0,703 \text{ Log H} - 0,417 \text{ Log (tan } \delta)$
	UCI	$\text{Log L} = 0,466 + 0,891 \text{ Log H} - 0,206 \text{ Log (tan } \delta)$

Nota: H es la caída vertical, δ es el ángulo del talud, V el volumen de deslizamiento y W el peso del deslizamiento. LCI y UCI son el intervalo superior e inferior del 95 % de confianza, respectivamente.

Fuente: Finlay et al., 1999, en Hungr et al., 2005.

Tabla 3-16. Ecuaciones de regresión para $\log (H/L) = A + B * \log V$.
Volumen en 10^3 m^3

AUTORES	A	B	R
Scheidegger, 1973	0,624	0,15666	0,82
Li Tianchi, 1983	0,664	- 0,1529	0,78
Nicoletti & Sorriso - Valvo, 1991	0,527	0,0847	0,37
Corominas, 1996 (promedio)	- 0,047	- 0,085	0,79

Fuente: Hungr et al., 2005.

Tabla 3-17. Ecuaciones de regresión para $\log (H/L) = A + B * \log V$

TIPO DE DESLIZAMIENTO	TRAYECTORIA	A	B	R2
Caída de rocas	Todo	0,210	- 0,109	0,76
	Obstruido	0,231	- 0,091	0,83
	Sin obstruir	0,167	- 0,119	0,92
Deslizamiento traslacional	Todo	- 0,159	- 0,068	0,67
	Obstruido	- 0,133	- 0,057	0,76
	Sin obstruir	- 0,143	- 0,080	0,80
Flujo de detritos	Todo	- 0,012	- 0,105	0,76
	Obstruido	- 0,049	- 0,108	0,85
	Sin obstruir	- 0,031	- 0,102	0,87
Flujos de tierra	Todo	- 0,214	- 0,070	0,65
	Sin obstruir	- 0,220	- 0,138	0,91

Fuente: Corominas (1996) para diferentes materiales (Hungr et al., 2005).

Tabla 3-18. Ecuaciones de regresión para $(H/L) = A + B * \tan \alpha$

TRAYECTORIA	A	B	R2	SD
Sin confinar	0,77	0,87	0,71	0,095
Parcialmente confinado	0,69	0,110	0,52	0,110
Confinado	0,54	0,27	0,85	0,027

Fuente: Hunter & Fell, 2003, en Hungr et al., 2005.

La distancia de viaje también se podrá estimar mediante la aplicación del método del bloque deslizando, como se muestra en la descripción de la intensidad. Los profesionales que desarrollen el estudio de riesgo evaluarán la correlación más adecuada, de acuerdo con las condiciones del terreno y los materiales en la zona de estudio. Se podrán emplear otras correlaciones reportadas en la bibliografía técnica internacional, como las expresiones de Hsü (1975) y Domaas (1994). En este caso, se indicará la referencia donde se presenta la correlación usada.

Intensidad

En la presente guía se define como parámetro de intensidad la velocidad de la masa involucrada. Para evaluar esta velocidad se propone emplear el método del bloque deslizando, el cual modela el movimiento del deslizamiento como el movimiento de un bloque sobre una superficie curva, con una resistencia friccional constante (figura 3-11).

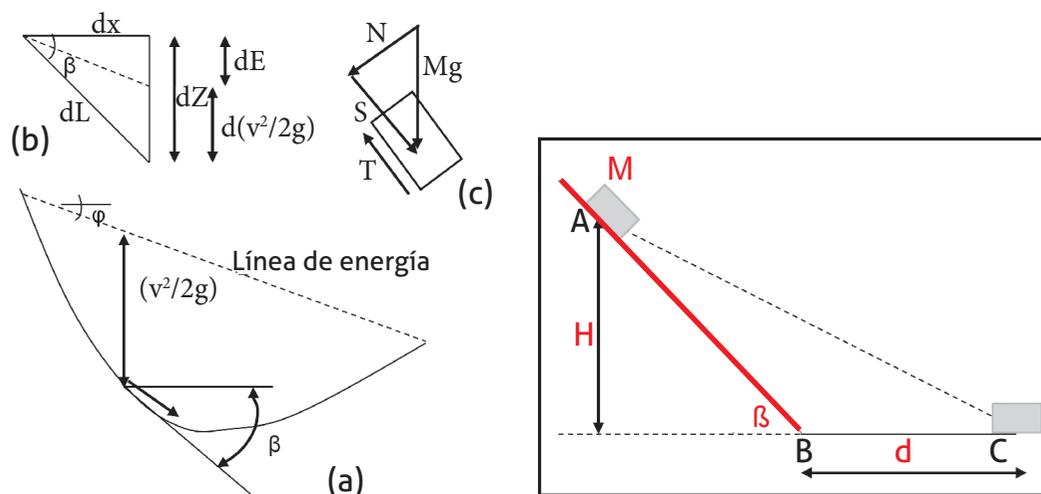


Figura 3-11. Bloque deslizando, consideraciones dinámicas. a) Perfil de la trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas. d) Planteamiento del problema.

Fuente: Yue, 2014.

Al aplicar las leyes de Newton y para una condición de se obtienen las siguientes ecuaciones (Yue, 2014):

$$\begin{cases} Mg\sin\beta - Mg\cos\beta\tan\phi = Ma(t) \text{ de A hasta B} \\ -Mg\tan\phi_p = Ma(t) \text{ de B hasta C} \end{cases} \quad (3-54)$$

Donde

M es la masa deslizada y g la aceleración de la gravedad.

β es la inclinación del terreno.

ϕ es el ángulo de fricción interna en el talud (A-B)

ϕ_p es el ángulo de fricción interna en la zona plana (B-C).

$a(t)$ es la aceleración desarrollada por la masa.

De esta manera, la velocidad desarrollada por la masa deslizada mientras baja por el tramo A-B está definida por la ecuación

$$V_{AB} = \sqrt{2Hg \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right)} \quad (3-55)$$

Presumiendo que no hay pérdida de energía a causa del impacto en el punto B, debido al cambio de pendiente, cambiando la dirección de la velocidad, la distancia de viaje d y el ángulo de viaje desde A hasta C están dados por las expresiones

$$d = \left(1 - \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\right) \frac{H}{\tan\phi_p} \quad (3-56)$$

$$\tan\alpha = \frac{\tan\beta\tan\phi_p}{\tan\beta + \tan\phi_p - \tan\phi} \quad (3-57)$$

Y la velocidad en el tramo B-C puede determinarse de acuerdo con la ecuación

$$V_{BC}^2 = V_B^2 - 2g\tan\phi_p d \quad (3-58)$$

Las velocidades calculadas permiten estimar la intensidad del deslizamiento para los diferentes escenarios, tal como se describe en el numeral 4.5 del capítulo de vulnerabilidad.



ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

CAPÍTULO CUATRO

4. Análisis de vulnerabilidad

Los análisis de vulnerabilidad a escala detallada (1:2000) se deben hacer en las zonas de amenaza alta, identificadas en la evaluación básica de amenaza a escala 1:5000, de acuerdo con lo indicado en el capítulo 3 de esta guía.

El procedimiento que aquí se describe es aplicable fundamentalmente en las zonas ocupadas por edificaciones. En aquellas zonas sin ocupar o zonas de futura expansión urbana podrá usarse la metodología, pero planteando los escenarios futuros de ocupación o de cambio de uso.

De acuerdo con el Decreto 1807 de 2014, promulgado por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, las etapas generales que se deben seguir para evaluar la vulnerabilidad son:

- Identificación y localización de los elementos expuestos.
- Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia.
- Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.
- Zonificación de la vulnerabilidad.

A la escala de trabajo que se requiere, la vulnerabilidad se ha de evaluar en forma cuantitativa, para lo cual se analizan los escenarios de vulnerabilidad ante los tipos de movimientos en masa esperados. Dichos escenarios incluyen tanto la exposición de los elementos (bienes físicos y personas) como su grado de fragilidad ante el evento amenazante. Al relacionar la intensidad de las masas que se pueden desplazar (en cuanto a su energía, su volumen o su deformación) con la fragilidad de los elementos expuestos, se pueden establecer unos niveles de daño para cada edificación, y con base en estos niveles de daño se definen las categorías de vulnerabilidad física que permiten realizar los mapas de zonificación de vulnerabilidad.

Por su parte, la vulnerabilidad de las personas se define en función de los posibles niveles de afectación en materia de pérdidas probables de vidas o de lesiones corporales, asociadas con los niveles de daño de las edificaciones, previamente evaluados. Aunque se trata de un aspecto importante, no es objeto de esta guía evaluar la vulnerabilidad social ni la vulnerabilidad funcional relacionada con probables pérdidas por interrupción de los sistemas productivos. No obstante, en las encuestas de vulnerabilidad se preguntan aspectos de tipo socioeconómico y cultural, que pueden emplearse en esta clase de análisis; de hecho, son necesarios para evaluar la vulnerabilidad de las personas, tales como edad, niveles de ingresos, grado de escolaridad, presencia de personas con algún tipo de discapacidad, redes sociales de apoyo, etc.

Con el fin de cumplir con los lineamientos del Decreto 1807 de 2014 y con las necesidades de evaluación cuantitativa, se requiere definir, en primer lugar, el área de estudio con

base en la zonificación de amenaza realizada previamente a escala 1:5000. Las áreas sujetas a estudios de vulnerabilidad y de riesgo son aquellas zonas ya ocupadas que se identificaron en la categoría de amenaza alta y aquellas identificadas en amenaza media, pero que requieren un cambio de densidad o de uso, tal como se indicó en el capítulo 2 de la guía. Luego de definidas las áreas de estudio, se debe aplicar el procedimiento general de evaluación de vulnerabilidad (figura 4-1), tal como se desarrolla en forma detallada a lo largo del presente capítulo.

En el anexo B se presentan los formatos para la toma de información *in situ* de las condiciones estructurales y de funcionalidad de las edificaciones. Estos formatos van acompañados de sus respectivos manuales para su correcto diligenciamiento.

4.1 Identificación y localización de los elementos expuestos

Como se presentó en el capítulo 1, los elementos expuestos incluyen tanto elementos físicos (bienes e infraestructura) como servicios ambientales, recursos económicos y sociales y bienes culturales, que por su localización pueden resultar afectados por la materialización de una amenaza. La metodología propuesta en esta guía está orientada a la evaluación de vulnerabilidad física con fines de estimaciones cuantitativas de riesgo, para lo cual los elementos expuestos se reducen a dos grupos: bienes físicos y personas (tabla 4-1).

Tabla 4-1. Elementos expuestos

CLASIFICACIÓN		IDENTIFICACIÓN	USO - COMPONENTES
Bienes Físicos	Edificaciones	Indispensables-Grupo IV (norma NSR-10)	Salud (pública/privada)
		Atención a la comunidad - Grupo III (norma NSR-10)	Seguridad
			Emergencia
			Educación
	Ocupación especial - Grupo II (norma NSR-10)	Institucionales	
		Gubernamentales	
		Centros comerciales	
	Ocupación normal - Grupo I (norma NSR-10)	Industria	
		Residencial y comercio	
Líneas Vitales	Red vial	Vías	
		Puentes vehiculares	
		Puentes peatonales	
	Servicios públicos	Líneas de acueducto, alcantarillado y gas (tuberías)	
Redes eléctricas y comunicaciones			
Personas		Población	

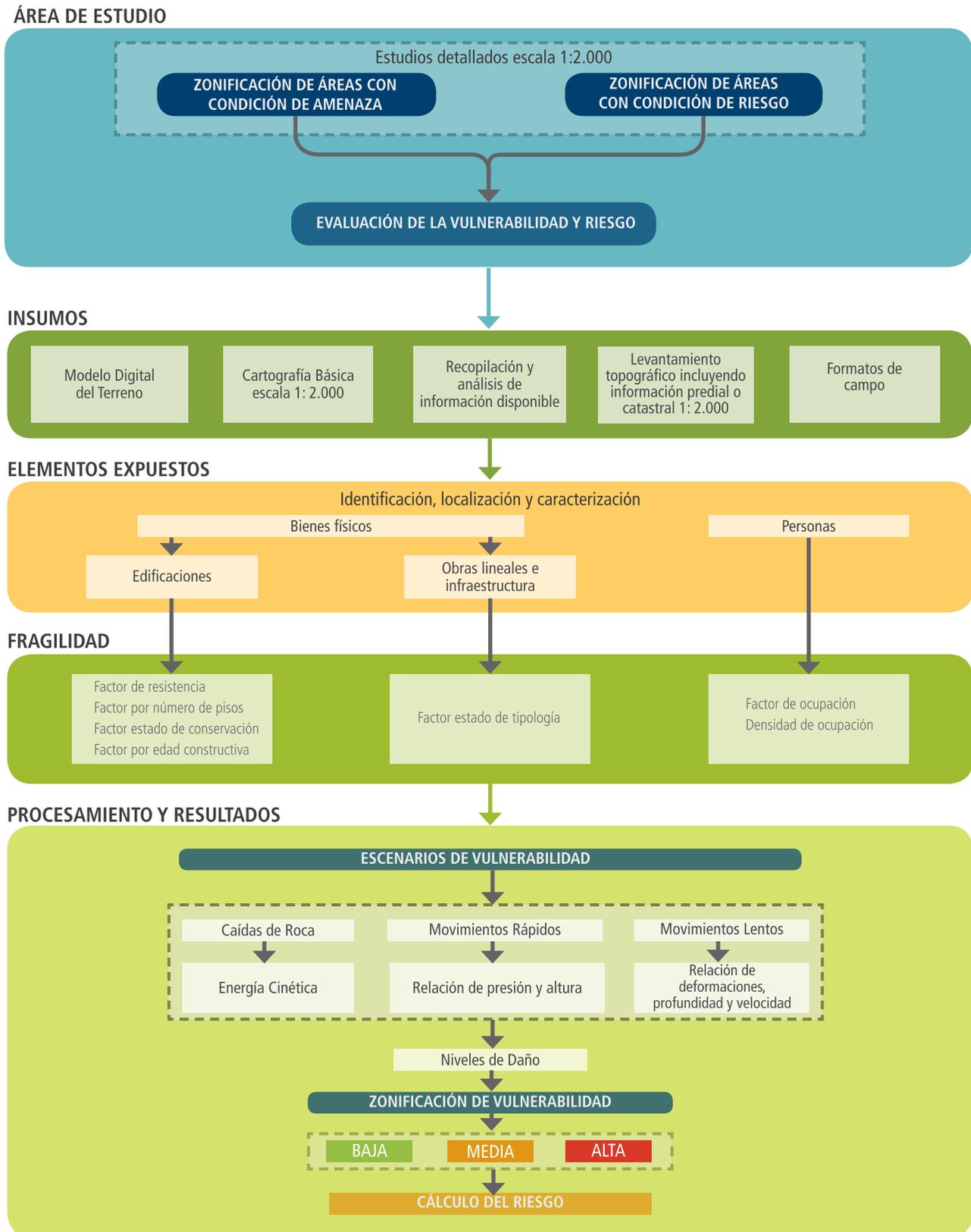


Figura 4-1. Procedimiento general para análisis de vulnerabilidad por movimientos en masa. Estudios detallados, a escala 1:2000.

La base para la identificación y localización de los elementos expuestos será la información predial o catastral presentada en el levantamiento topográfico, de acuerdo con los insumos mínimos para la elaboración de estudios detallados de amenaza y riesgo. Esta información se ha de complementar o actualizar con la obtenida en los formatos del anexo B, con el fin de representarla espacialmente sobre la base topográfica disponible. Cada bien físico representado de manera cartográfica se debe identificar y caracterizar mediante el diligenciamiento total del formato. Las categorías para la agrupación y posterior representación de los elementos deben permitir las primeras valoraciones cuantitativas (tabla 4-2).

Parámetros tales como el nivel socioeconómico (estratificación), avalúo catastral (millones de pesos) o aspectos macroeconómicos y sociales (avalúo comercial y uso del suelo) permiten identificar los elementos expuestos en materia de infraestructura, facilitando su representación y análisis espacial con SIG en un nivel de detalle como el requerido en esta guía (Yamín et al., 2013).

Tabla 4-2. Valoración de elementos para evaluación de riesgo

USO	PARÁMETROS QUE HAY QUE CARACTERIZAR		
Residencial de capacidad económica baja	Número de edificaciones	Área construida (miles de m ²)	Valor de reposición (en millones de COP)
Residencial de capacidad económica media			
Residencial de capacidad económica alta			
Comercial			
Institucional			
Salud (pública o privada)			
Educación (pública o privada)			
Gubernamentales			
Otros			
Totales			

Fuente: Yamín et al., 2013.

La vulnerabilidad física de personas depende de factores relacionados tanto con la amenaza (tipo, tamaño, distribución e intensidad del evento) como con la capacidad de respuesta y resistencia de los individuos. A causa de la complejidad y dinámica de la naturaleza humana, la vulnerabilidad de las personas cambia en el tiempo e involucra grandes incertidumbres que inciden directamente en el planteamiento de metodologías de evaluación basadas en el conocimiento experto y datos empíricos. En el contexto de esta guía, la vulnerabilidad física de personas se considerará en conjunto con la vulnerabilidad física de las edificaciones, asociada como un factor de vulnerabilidad, con arreglo a relaciones empíricas como las que presentan Uzielli et al. (2008) y Nadim (2013), o como un factor de ocupación por medio de factores como el uso del suelo y la clasificación socioeconómica de cada edificación.

Según Yamín et al. (2013), un análisis por escenarios de ocupación permite estimar la vulnerabilidad de personas como un porcentaje respecto a la ocupación máxima estimada de las edificaciones. Para este fin, se plantea el uso de índices de ocupación calculados con el análisis de la información obtenida en el numeral 2.9 del formato B-1 del anexo B, que son

parte de la etapa de identificación y localización de los elementos expuestos. La densidad de la ocupación máxima de la edificación corresponde al número máximo de personas que pueden habitarla con respecto al área total construida y en un determinado momento. Por su parte, la densidad de ocupación máxima del terreno se establece como el número máximo de personas que pueden habitar la edificación en algún momento en relación con el área total del terreno que ocupa dicha construcción.

La identificación y localización de personas se puede representar espacialmente con los siguientes indicadores:

- Distribución de la densidad poblacional por m² de construcción, por manzana.
- Distribución de la densidad de la población por m² de terreno, por manzana.
- Densidad poblacional por manzana (hab./km²).

4.2 Caracterización de los elementos expuestos

A partir de la información primaria conseguida tanto en los trabajos de topografía como en el diligenciamiento del formato B-1 del anexo B, se puede llevar a cabo la fase de caracterización de los elementos expuestos. De acuerdo con las exigencias de la normativa existente, con el tamaño de las áreas urbanizadas de los municipios categorías 5 y 6 y con la escala en que se requieren los estudios, la encuesta se debe aplicar en todos los predios dentro de las zonas con condición de amenaza y riesgo identificadas en los estudios básicos (1:5000), tal como se explicó en el capítulo anterior.

Cada elemento identificado y localizado se debe describir y categorizar en función de sus características de tipología, exposición y fragilidad, con el propósito de evaluar su vulnerabilidad física ante la ocurrencia de un movimiento en masa. La propuesta de caracterización presentada a continuación se ha adaptado para la evaluación cuantitativa de vulnerabilidad presentada por Uzielli et al. (2010).

Tipología

Edificaciones. Para efectos de aplicación de esta guía, las tipologías de edificaciones, definidas a partir de los trabajos de Heinimann (1999) y Jam (2007), se presentan en la tabla 4-3.

Tabla 4-3. Tipologías de edificaciones

CÓDIGO	TIPO DE EDIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
A	Edificaciones con reforzamiento especial	Edificaciones de concreto y acero diseñadas y construidas con requerimientos superiores a los convencionales o con la exigencia máxima de los códigos de diseño. Se incluyen las edificaciones de los grupos de importancia III y IV, definidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10, que se construyeron después de 1998, con pórticos en concreto reforzado, sistema combinado en concreto reforzado, pórticos resistentes a momentos en acero, pórticos arriostrados en acero, etc.

(pasa...)

(viene...)

CÓDIGO	TIPO DE EDIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
B	Edificaciones reforzadas	Edificaciones con estructura en concreto y acero de los grupos de importancia I y II construidas con pórticos en concreto reforzado, sistema combinado en concreto reforzado, pórticos resistentes a momentos en acero, pórticos arriostrados en acero, etc. También se incluyen aquellas del grupo A construidas antes de 1998.
C	Mampostería reforzada	Aquellas edificaciones que tienen un sistema estructural de mampostería con elementos de refuerzo (barras, láminas, pernos, platinas, etc.). También se incluyen las edificaciones en mampostería confinada.
D	Estructuras con confinamiento deficiente y estructuras híbridas	Edificaciones con muros cargueros, pero sin confinamiento adecuado (mampostería no reforzada). También hace referencia a aquellas construcciones de las categorías A, B y C que poseen elementos de otros materiales no competentes, como por ejemplo mampostería no reforzada, adobe, bahareque, madera, tapia pisada, etc., con mayor componente de elementos de los grupos A, B y C.
E	Estructuras ligeras	Edificaciones construidas con materiales tradicionales o de baja calidad, con un sistema estructural de muros cargueros. Dentro de esta tipología se incluyen las edificaciones construidas con materiales como adobe, bahareque, madera bruta, tapia pisada y las prefabricadas.
F	Construcciones simples	Edificaciones que no poseen una estructura definida, de carácter improvisado, generalmente construidas utilizando materiales precarios o de recuperación. Entre estas se incluyen las edificaciones en proceso de construcción y las construidas en materiales de recuperación, pórticos y paneles de madera, y pórticos de madera y paneles en otros materiales. Son ejemplo de este tipo de edificaciones tugurios, ranchos, campamentos, carpas, etc.
G	Lotes vacíos	

Para definir la tipología de edificaciones se deben tomar los criterios e información propuestos en la sección 3 del formato B-1 del anexo B.

Las obras lineales consideradas en esta guía se pueden clasificar, según el tipo de infraestructura urbana, como:

Red vial. De acuerdo con Argyroudís et al. (2005), se emplea la clasificación urbana de vías (tabla 4-4). En el inventario de la red vial se deben incluir estructuras como puentes vehiculares o peatonales.

Tabla 4-4. Clasificación de la red vial

CLASIFICACIÓN	TIPO	ANCHO (m)
Autopista	V-0	100
Arterial principal	V-1	60
Arterial secundaria	V-2	40
	V-3	25
Vial intermedia	V-4	22
	V-5	18
	V-6	16
Vial local	V-7	13
	V-8	10
	V-9	8

Fuente: Adaptada de Argyroudis et al. (2005), de acuerdo con las categorías definidas por la Oficina de Planeación de Bogotá.

Infraestructura de servicios públicos. La infraestructura urbana relacionada con servicios públicos se divide en esta guía en las redes constituidas por tuberías, en las que se incluyen los elementos de los sistemas de acueducto y alcantarillado, y en las redes aéreas, donde se incluye el sistema eléctrico y de comunicaciones. Estos dos grupos se clasifican en las categorías que se presentan a continuación (tablas 4-5, 4-6 y 4-7).

Tabla 4-5. Clasificación de la red del sistema de acueducto

CLASIFICACIÓN	DIÁMETRO (PULGADAS)
Red matriz*	>12
Red primaria*	6-12
Red secundaria	2-6
Red local	½-2

* No son comunes en poblaciones menores de 20.000 habitantes.

Fuente: Ministerio de Desarrollo Económico, 1999.

Tabla 4-6. Clasificación de la red del sistema de alcantarillado, según clasificación del acueducto de Bogotá

CLASIFICACIÓN	DIÁMETRO (PULGADAS)
Red troncal	≥18
Red secundaria	
Red local	<18
Canales	--

Tabla 4-7. Clasificación de la red del sistema eléctrico

CLASIFICACIÓN	TENSIÓN ELÉCTRICA	USO
Alta tensión	57,5-230 kV	Transporte y distribución
Media tensión	1-57,5 kV	Producción y distribución
Baja tensión	<1 kV	Distribución y consumo

Fuente: Retie (2012), NTC 1340.

En razón de que esta guía se desarrolla para ambientes urbanos, se escapan de su alcance la evaluación del riesgo en zonas rurales, así como las zonas atravesadas por las redes de conducción de acueducto (redes que transportan el agua desde su fuente o lugar de tratamiento a la cabecera municipal); además, para su evaluación es necesario hacer estudios específicos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. En el informe de los estudios efectuados con esta guía se debe incluir una inspección visual general, en la que se identifiquen los puntos críticos o en amenaza del trazado de tales redes.

4.3 Exposición

De acuerdo con el marco metodológico propuesto en esta guía, la vulnerabilidad física hace referencia a la respuesta de los elementos expuestos frente a las sollicitaciones generadas por

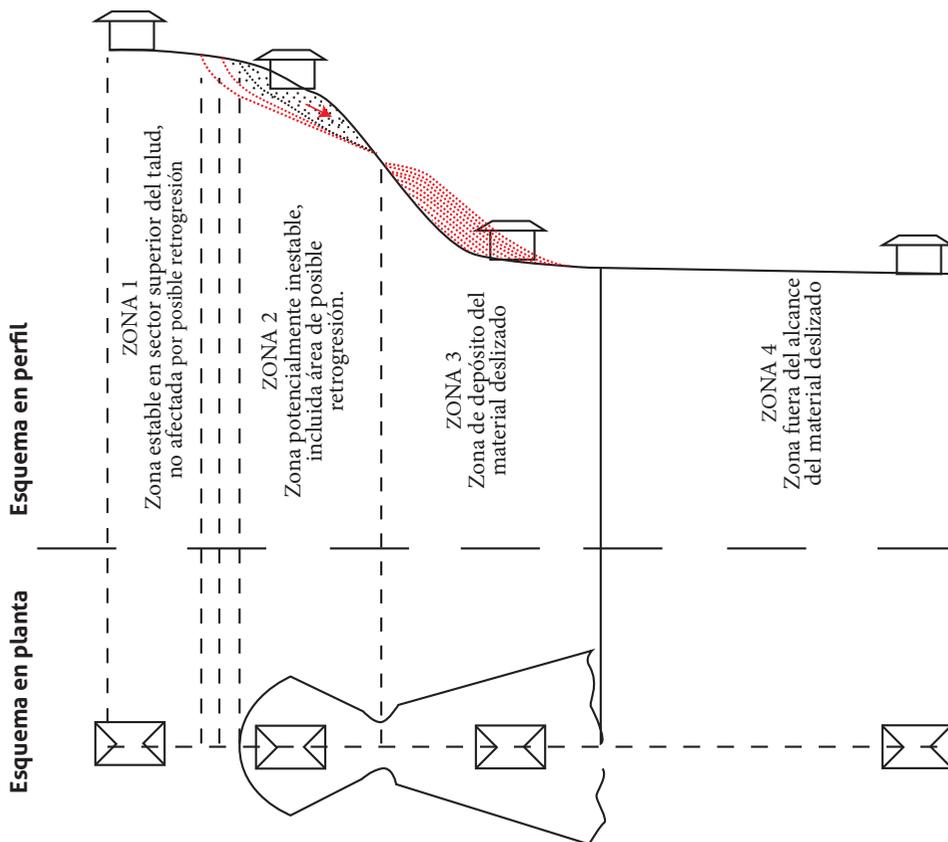


Figura 4-2. Zonas de exposición de los elementos ante un deslizamiento.

la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos. En bienes físicos, esta respuesta y la intensidad de la sollicitación dependen de dos aspectos: las características del elemento (tipología, calidad de construcción, mantenimiento, uso, etc.) y su posición relativa con respecto al área afectada por el evento (exposición).

Para evaluar la exposición se han definido cuatro zonas o escenarios, conforme al esquema presentado en la figura 4-2 (página anterior), las cuales se describen más adelante (tabla 4-8).

Tabla 4-8. Zonas o escenarios de exposición

ZONA	DESCRIPCIÓN	DAÑOS ESPERADOS	CRITERIO DE INTENSIDAD O MAGNITUD
1	Elementos ubicados sobre la zona estable en la parte superior del talud, sin posibilidad de afectación por retrogresión.	No se esperan daños a causa de los movimientos en masa.	
2	Elementos ubicados sobre una ladera potencialmente inestable o potencialmente afectados por efectos de retrogresión.	Colapso o daños instantáneos debido a pérdida de soporte en la zona de retrogresión. Asentamientos diferenciales, inclinaciones y agrietamientos asociados con movimientos lentos; colapso de la estructura asociado con movimientos rápidos.	Velocidad del movimiento Actividad del deslizamiento Cantidad de desplazamiento Desplazamientos verticales
3	Elementos ubicados en la trayectoria del movimiento en masa o en la zona de depósito del material deslizado.	Daños localizados por impacto, colapso total, obstrucción, enterramiento, entre otros.	Velocidad del movimiento Distancia de viaje Presiones laterales Impactos (volúmenes y energía cinética) Alturas de acumulación de material
4	Elementos fuera del alcance del movimiento en masa y su área de depósito.	No se esperan daños debidos a los movimientos en masa.	

Para aplicar la metodología de análisis de vulnerabilidad se debe establecer la situación de exposición de los elementos y el parámetro de intensidad o magnitud que hay que utilizar, por lo cual se agruparon unos escenarios (tabla 4-8) con una aplicación determinada (tabla 4-9). Este análisis debe hacerse sobre las secciones de análisis de estabilidad definidas en el apartado 3.2.2 del capítulo 3.

Tabla 4-9. Parámetros de intensidad o amenaza para evaluación de vulnerabilidad

ZONA	PARÁMETRO DE AMENAZA	
	INTENSIDAD	MAGNITUD
2	Velocidad del movimiento	Posibilidad cinemática del movimiento Profundidad de la superficie de falla
3	Velocidad del movimiento Presión de impacto Energía de impacto	Distancia de viaje Altura de la masa deslizada Profundidad de la superficie de falla

4.4 Fragilidad

Por fragilidad se entiende la respuesta de los elementos expuestos frente a las sollicitaciones generadas por la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos. En bienes materiales, esta respuesta depende de las características del elemento expuesto, y en personas, de la capacidad de respuesta y la posición relativa con respecto al área afectada por el evento.

4.4.1 Fragilidad de edificaciones

Siguiendo la metodología propuesta por Li et al. (2009), modificada por Du et al. (2013, 2014), en la presente guía se consideran cuatro parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones, relativos al tipo de estructura (S_{tip}), su altura (S_{alt}), su conservación (S_{con}) y su edad (S_{ed}). Partiendo de estos parámetros, se calcula la fragilidad de la estructura (S_e) con la ecuación (4-1), que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa como la ecuación (4-2):

$$S_e = 1 - \prod(1 - s_i) \quad (4-1)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed}) \quad (4-2)$$

Los parámetros de resistencia que se indican en la ecuación (4-2) se estiman de la siguiente manera:

Factor de fragilidad por tipo de estructura (S_{tip}). Para el tipo de estructura se consideran los factores de resistencia, propuestos por Du et al. (2013) a partir de las tipologías establecidas por Heinimann (1999), que se resumen a continuación (tabla 4-10).

Tabla 4-10. Factores de fragilidad por tipología de estructuras

TIPOLOGÍA		FRAGILIDAD	S_{tip}
F	Construcciones simples	Muy alta	1,00
E	Estructuras ligeras	Alta	0,90
D	Estructuras con confinamiento deficiente	Media	0,70
C	Mampostería reforzada	Baja	0,50

(pasa...)

(viene...)

TIPOLOGÍA		FRAGILIDAD	S_{tip}
B	Edificaciones reforzadas	Muy baja	0,30
A	Edificaciones con reforzamiento especial	Extremadamente baja	0,10

Fuente: Heinimann, 1999, en Du et al., 2013.

Factor de fragilidad por altura de la estructura (S_{tip}). La fragilidad de la estructura en función de su número de pisos se aprecia a renglón seguido (tabla 4-11). Los valores de los parámetros se dan con base en la propuesta de Li et al. (2010), modificados de acuerdo con la cultura constructiva del país.

Tabla 4-11. Factor de fragilidad por altura de la edificación

TIPOLOGÍA	NÚMERO DE PISOS	S_{alt}
E, F	≥ 2	0,90
D	≥ 4	0,90
D	2 y 3	0,60
Demás tipologías y alturas		0,05

Factor de fragilidad por conservación de la estructura (S_{con}). El estado de conservación se evalúa a partir de la inspección visual de las edificaciones y se califica de acuerdo con los valores del parámetro de fragilidad propuesto por Du et al. (2013-2014) (tabla 4-12).

Tabla 4-12. Factores de fragilidad por estado de conservación de la edificación

ESTADO DE CONSERVACIÓN	DESCRIPCIÓN	SEPARACIÓN GRIETAS (mm)	S_{con}
Muy bueno	No se observan deformaciones, agrietamiento o envejecimiento.	0	0,00
Bueno	Solo se observan daños superficiales leves en los acabados.	0-0,5	0,05
Deformaciones leves	Fisuras en juntas horizontales en los extremos superior e inferior de elementos verticales.	0,5-1,0	0,25
Deformaciones medias	Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera de él (pandeo).	1,0-5,0	0,50
Deformaciones graves	Inclinaciones del elemento fuera de su plano vertical.	5,0-10,0	0,75
Deformaciones muy graves	Unidades de mampostería con fallas por aplastamiento. Concreto con fallas por aplastamiento.	>10,0	1,00

Fuente: Adaptado de Audell, 1996, consultada en Rodríguez y Jiménez, 2009.

La evaluación del estado de conservación de la estructura se hará con base en la descripción presentada en el formato B-1 del anexo B, en el que se detallan los estados de conservación de elementos estructurales horizontales y verticales y no estructurales.

Factor de fragilidad por edad de la estructura (S_{ed}). El parámetro de fragilidad relativo a la edad de la edificación se estima a partir de la relación de los años de servicio con respecto a la vida útil de diseño de la edificación (servicio/vida útil). Los valores de este parámetro corresponden a los propuestos por Du et al. (2013-2014) (tabla 4-13).

Tabla 4-13. Factor de fragilidad por edad de la edificación

RELACIÓN AÑOS DE SERVICIO/VIDA ÚTIL	S_{ed}
≤0,1	0,05
0,1-0,4	0,10
0,4-0,6	0,30
0,6-0,8	0,50
0,8-1,0	0,70
1,0-1,2	0,80
>1,2	1,00

Fuente: Du et al., 2013.

El profesional a cargo de la evaluación del riesgo deberá determinar la edad de las edificaciones y su periodo de diseño, en caso de que estas tengan un diseño formal. En el evento de que no se hallara información sobre el periodo de diseño de la edificación, el profesional podrá calcular la vida útil de la estructura con base en sus características, a partir de información secundaria debidamente soportada. Se recomienda emplear los valores de vida útil en función del tipo de edificación (tabla 4-14).

Tabla 4-14. Vida útil en función del tipo de edificación

TIPOLOGÍA	VIDA ÚTIL
A y B	50 años
C y D	30 años
E	15 años
F	1-2 años

4.4.2 Fragilidad de líneas vitales

Para el caso de las líneas vitales, su fragilidad se estima a partir de un solo parámetro de fragilidad. La formulación de los parámetros que acá se presentan se hizo con base en la información disponible de los fabricantes de los elementos considerados. Para más detalles, se puede consultar el documento conceptual de esta guía.

Red vial. El parámetro de fragilidad para las vías se establece en función de su ancho, de acuerdo con la ecuación

$$S_{\text{ancho}} = 3,0 / W_{\text{via}} \quad (4-3)$$

Donde

W_{via} es el ancho de la vía en metros y 3,0 corresponde al ancho de carril mínimo para que un vehículo pueda transitar en condiciones normales.

Red de acueducto. A partir del diámetro de las tuberías de la red se establece el parámetro de fragilidad de estas (tabla 4-15).

Tabla 4-15. Parámetro de fragilidad de tuberías

DIÁMETRO (PULGADAS)	S_{diam}
½	1,00
¾	0,44
1	0,25
1 ¼	0,16
1 ½	0,11
2	0,06

Red de alcantarillado. De modo similar, se define el parámetro de fragilidad de las tuberías de las redes de alcantarillado en función de su material de fabricación (tabla 4-16).

Tabla 4-16. Parámetro de fragilidad de red de alcantarillado

MATERIAL	S_{mat}
Asbesto cemento	0,90
Gres	0,60
Concreto simple	0,60
Polietileno	0,50
Concreto reforzado	0,10

Redes eléctricas y de telecomunicaciones. Se considera la vulnerabilidad de las redes aéreas como el daño que sufren los postes que las conforman. El parámetro de fragilidad para este tipo de red se define entonces a partir de la carga nominal de rotura de los postes de concreto, de acuerdo con las normas Retie e Icontec (tabla 4-17).

Tabla 4-17. Parámetro de fragilidad de redes eléctricas y de comunicaciones

CARGA MÍNIMA DE ROTURA (kN)	S_{carga}
Madera	1,00
5001	0,90
7355	0,82
10300	0,70
13220	0,62
17640	0,53
19600	0,51

En caso de que no se pueda determinar la carga mínima nominal de rotura de los postes de concreto que conforman la red, se presume que esta corresponde a la menor, asignándole el valor de 5001 N y el correspondiente parámetro de fragilidad.

4.4.3 Fragilidad de personas

Como ya se mencionó, la vulnerabilidad física de personas se evaluará en conjunto con la vulnerabilidad de edificaciones. Algunos autores han propuesto la fragilidad de personas como una función exponencial de la fragilidad de las edificaciones (Ragozin & Tikhvinsky, 2000; Uzielli, 2006); otros, valores fijos de vulnerabilidad, de acuerdo con criterio experto y recopilación de información antecedente (AGS, 2007c). En esta guía se propone la fragilidad de personas en estructuras en función de la fragilidad de tales estructuras, de acuerdo con la ecuación (4-4) (figura 4-3):

$$S_{per} = (S_e)^{3.2} \quad (4-4)$$

Donde
 S_{per} es la fragilidad de las personas.

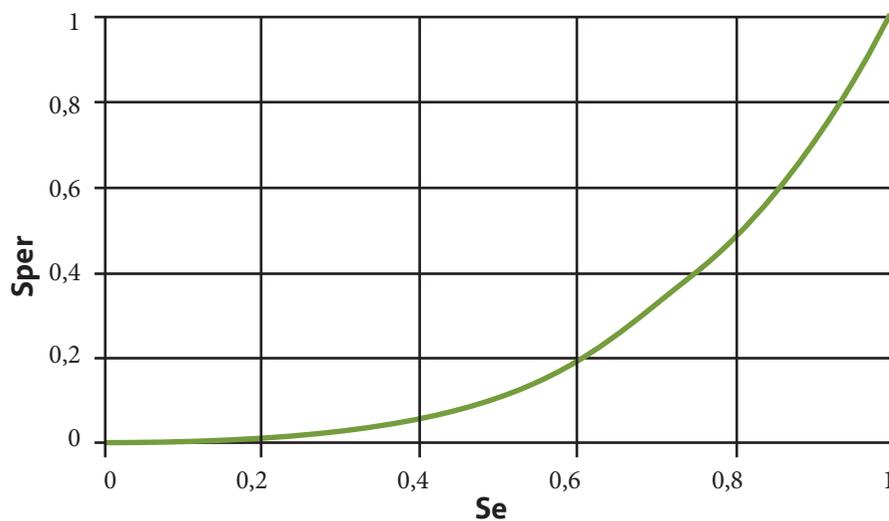


Figura 4-3. Modelo de fragilidad propuesto para personas en estructuras.

Fuente: Uzielli et al., 2008.

4.5 Escenarios de vulnerabilidad. Tipos de daño

Para estimar la intensidad de los eventos amenazantes se han considerado tres escenarios de deformación del terreno: un escenario de deslizamientos de baja deformación (movi-

mientos lentos), un escenario de deslizamientos en etapa de falla (movimientos rápidos) y un escenario de caída de rocas.

4.5.1 Escenario de baja velocidad de deformación (movimientos lentos)

4.5.1.1 Intensidad de deslizamientos lentos sobre las edificaciones

En el presente caso, se consideran las edificaciones ubicadas en la zona 2 de exposición; en este escenario, se pueden generar agrietamientos y lado en las estructuras sobre la masa deslizada debido al desplazamiento de esta. Los parámetros de intensidad para este escenario de análisis, según la propuesta de Du et al. (2013), son la velocidad, las deformaciones locales y la profundidad del deslizamiento, relacionadas de acuerdo con la ecuación (4-5):

$$I_{len} = 1 - (1 - I_{l-def}) (1 - I_{l-vel}) (1 - I_{l-prof}) \quad (4-5)$$

Donde

I_{len} es la intensidad para movimientos lentos. Un valor de intensidad de 1,0 indica que el evento tiene el potencial de destruir todos los elementos en su trayectoria.

I_{l-def} es el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen asentamientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones. El parámetro de intensidad I_{l-def} se da para la relación de estas deformaciones con respecto a los umbrales tolerables según la tipología de la edificación (tabla 4-18.)

Tabla 4-18 . Relación deformación/umbral tolerable

RELACIÓN DEFORMACIÓN/ UMBRAL TOLERABLE	I_{l-def}
<0,2	0,1
0,2-0,4	0,2
0,4-0,6	0,4
0,6-0,8	0,6
0,8-1,0	0,8
1,0-1,2	0,9
$\geq 1,2$	1,0

Los umbrales tolerables de deformación en esta guía se toman de los valores máximos de asentamientos diferenciales definidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10, en su artículo H.4.9.3. Límites de asentamientos diferenciales. Estos umbrales se definen para diversos tipos de construcciones, en función de la distancia entre apoyos (tabla 4-19).

Tabla 4-19. Umbrales tolerables de deformación (límites de asentamiento diferencial NSR-10)

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	$A_{m\acute{a}x}$
Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{1000}$
Edificaciones con muros de carga en concreto o mampostería	$\frac{l}{500}$
Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{300}$
Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores	$\frac{l}{160}$

La distancia entre apoyos o columnas se deberá estimar de acuerdo con lo estipulado en la sección 3 del formato B-1, presentado en el anexo B.

I_{l-vel} es el parámetro de intensidad por velocidad. De acuerdo con la clasificación de Cruden y Varnes (1996), Li et al. (2010) han propuesto el parámetro de intensidad por velocidad que está dado por la ecuación (4-6):

$$I_{l-vel} = \begin{cases} 0 & v \leq 5 \times 10^{-7} \\ \frac{1}{36} (\text{Log } v + 6,30)^2 & 5 \times 10^{-7} < v < 5 \times 10^{-1} \\ 1 & v \geq 5 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (4-6)$$

Con la velocidad, v , en mm/s.

I_{l-prof} es el parámetro de intensidad por profundidad de la masa deslizada. Para edificaciones localizadas sobre deslizamientos activos, el grado de daño depende principalmente de la profundidad relativa de la cimentación de la estructura con respecto a la profundidad de la superficie de falla. A continuación se presentan las ecuaciones para calcular este parámetro en función de la profundidad de cimentación h (m) y la profundidad de la superficie de falla d (m), conforme a la propuesta de Ragozin (2000) en Du et al. (2013):

$$I_{l-prof} = \begin{cases} (1,25d/h)^{1/3} & d/h < 0,8 \\ 1 & 0,8 < d/h \leq 1,2 \\ 1,44(d/h)^{-2} & d/h > 1,2 \end{cases} \quad (4-7)$$

El profesional a cargo de la evaluación del riesgo deberá determinar la profundidad aproximada de las edificaciones. En caso de no poder determinar este valor en forma directa, podrá estimar la vida útil de la estructura con base en sus características a partir

de información secundaria debidamente soportada. Para edificaciones de los grupos I y II, definidos por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10, la profundidad común de las cimentaciones superficiales se encuentra entre 0,30 y 1,0 m; el profesional a cargo podrá calcular el valor en este rango a partir de información secundaria debidamente soportada, en caso de poseer información adicional.

4.5.1.2 Intensidad de los deslizamientos en líneas vitales

Para el caso de las líneas vitales se emplea el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen hundimientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones. Al igual que en edificaciones, este parámetro de intensidad se da para la relación de las deformaciones inducidas con respecto a los umbrales tolerables, como se muestra en la tabla 4-20.

Tabla 4-20 . Relación deformación/umbral tolerable

RELACIÓN DEFORMACIÓN/ UMBRAL TOLERABLE	I_{L-def}
<0,2	0,1
0,2-0,4	0,2
0,4-0,6	0,4
0,6-0,8	0,6
0,8-1,0	0,8
1,0-1,2	0,9
$\geq 1,2$	1,0

Red vial

Para el caso de vías, de acuerdo con los niveles de daño definidos para los pavimentos flexibles y rígidos en las guías de inspección visual del Invías (2006 a y b), el umbral tolerable de deformación es 40 mm.

Red de acueducto

Considerando que el deslizamiento impone una carga uniforme a lo largo del tubo, los umbrales tolerables están dados por la ecuación

$$\delta = 0,0075 \frac{1}{D} \quad (4-8)$$

con el diámetro D en metros.

Red de alcantarillado

Teniendo en cuenta las características de las uniones de las tuberías de gres (las más frecuentes en las zonas de aplicación de esta guía), se define un umbral tolerable de 5 cm.

Redes eléctricas y de telecomunicaciones

Para este caso se recomienda utilizar la mitad de la flecha máxima permitida para el diseño de los postes, correspondiente al 3 % de la altura nominal de estos.

4.5.2 Escenario de alta velocidad de deformación (movimientos rápidos)

Los elementos ubicados en la zona 2 de exposición se destruyen totalmente en este escenario. Para los elementos dentro de la zona de viaje del deslizamiento, el mecanismo de impacto se divide en dos categorías: enterramiento e impacto.

4.5.2.1 Intensidad de deslizamientos rápidos en edificaciones

En términos generales, la intensidad de los movimientos en masa en este escenario se define en función de su profundidad y de la presión de impacto según la ecuación (4-9), propuesta por Du et al. (2014):

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) (1 - I_{f-prof}) \quad (4-9)$$

I_{rap} es la intensidad para el escenario con movimientos rápidos.

I_{f-pre} es el parámetro de intensidad debido a la presión y se estima a partir de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la estructura (tabla 4-21).

Tabla 4-21. Parámetro de intensidad por presión de impacto. Relación presión deslizamiento/presión límite estructura

RELACIÓN PRESIÓN DE IMPACTO DE DESLIZAMIENTO/ PRESIÓN HORIZONTAL LÍMITE DE ESTRUCTURA	I_{f-pre}
<0,1	0,05
0,1-0,2	0,20
0,2-0,4	0,40
0,4-0,7	0,70
0,7-1,0	0,90
≥1,0	1,00

Fuente: Du et al., 2014.

La presión límite de la estructura de la tabla anterior se puede estimar a partir de los datos de la tabla siguiente (tabla 4-22), indicados por Du et al. (2014), en términos de las presiones de falla para diferentes tipos de estructuras.

Tabla 4-22. Presión de falla según tipología de estructura

TIPOLOGÍA		PRESIÓN LÍMITE DE LA ESTRUCTURA (kPa)
F	Construcciones simples	1
E	Estructuras ligeras	5
D	Estructuras con confinamiento deficiente	8
C	Mampostería reforzada	11
B	Edificaciones reforzadas	18
A	Edificaciones con reforzamiento especial	20

Fuente: Du et al., 2014.

Por su parte, la carga lateral y la presión de los movimientos rápidos son función del cuadrado de la velocidad que desarrolla. Así, la presión puede aproximarse mediante la ecuación

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4-10)$$

Donde

P es la presión de impacto (kPa).

ρ es la densidad de la masa movida (kg/m^3) y v es la velocidad (m/s). La estimación de la velocidad se ha tratado en el capítulo 2. Con estos dos valores, presión de impacto y presión límite de la estructura, se puede calcular $I_{f\text{-}prof}$ (tabla 4-21).

$I_{f\text{-}prof}$ es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la edificación (tabla 4-23).

Tabla 4-23. Parámetro de intensidad relación profundidad/altura de la estructura

RELACIÓN PROFUNDIDAD DEL DESLIZAMIENTO/ ALTURA EDIFICACIÓN	$I_{f\text{-}prof}$
<0,2	0,10
0,2-0,4	0,30
0,4-0,6	0,50
0,6-0,8	0,70
0,8-1,0	0,90
$\geq 1,0$	1,00

4.5.2.2 Intensidad de deslizamientos rápidos en líneas vitales

Para tomar en cuenta los aspectos de impacto y enterramiento en las líneas vitales, se contemplan los parámetros de intensidad en función del ancho invadido, para redes viales; los desplazamientos inducidos al terreno, para redes de acueducto y alcantarillado, y la presión de tierras ejercida por el deslizamiento sobre los postes de las redes de electricidad y telecomunicaciones.

El parámetro de intensidad de la amenaza para redes viales se define a partir del ancho de vía invadido u ocupado por la masa deslizada, de acuerdo con la ecuación (4-11). El ancho invadido se determinará a partir de la distancia de viaje calculada de acuerdo con los métodos presentados en el capítulo de amenaza. Este procedimiento también es válido para caída de rocas.

$$I_{dist} = \frac{L_p}{W_{aisl} + W_{efec}} \quad (4-11)$$

Donde

L_p es la distancia de viaje medida desde la pata del talud.

W_{aisl} es el ancho de los elementos que se encuentran entre la calzada y la pata del talud, tales como bermas, andenes, zonas verdes, lotes vacíos, etc.

W_{efec} es el ancho de la calzada útil para el tránsito de vehículos.

Para evaluar la vulnerabilidad de redes de acueducto y alcantarillado, con un escenario de movimiento rápido de la masa inestable, se establece el parámetro en función de la relación de desplazamientos inducidos y el umbral tolerable, como se definió en el numeral anterior (tabla 4-20). Los umbrales de deformación de estas redes se definen en el mismo numeral.

En el caso de las redes eléctricas, se contempla la presión de tierras crítica ejercida por la masa deslizada sobre los postes que conforman la red. A continuación se define el parámetro de intensidad en función de la presión de tierras crítica, expresada como la relación entre altura del deslizamiento y la altura nominal del poste (tabla 4-24).

Tabla 4-24. Relación altura deslizamiento/altura nominal poste

RELACIÓN ALTURA DESLIZAMIENTO/ALTURA NOMINAL POSTE	I_{alt}
≤0,1	0,1
0,2	0,4
0,25	0,7
≥0,3	1,0

4.5.3 Escenario de caída de rocas

La metodología para el análisis de la vulnerabilidad de edificaciones por caída de rocas se basa en los estudios presentados por Corominas en SafeLand (antes Mavrouli & Corominas, 2010), específicamente en el análisis mediante la definición de un índice de daño. En estos estudios los autores definen, a partir de modelación numérica, una energía de falla para elementos primarios de una edificación en concreto reforzado de 14 kJ. En edificaciones en concreto reforzado, los elementos primarios corresponden a las columnas y vigas de la estructura; en las otras tipologías, son los muros cargueros.

En virtud de que la energía de falla se definió para una edificación en concreto reforzado, para las demás tipologías se sugiere utilizar los factores que se presentan a renglón seguido (tabla 4-25).

Tabla 4-25. Factor para la energía de falla de los elementos estructurales primarios, según tipología de estructura

	TIPOLOGÍA	FACTOR
F	Construcciones simples	0,10
E	Estructuras ligeras	0,25
D	Estructuras con confinamiento deficiente	0,60
C	Mampostería reforzada	0,80
B	Edificaciones reforzadas	1,00
A	Edificaciones con reforzamiento especial	1,20

4.5.3.1 Probabilidad de colisión

Se requiere definir una probabilidad de colisión de los bloques con los elementos componentes de la edificación. Las siguientes ecuaciones (4-12 a 4-14) permiten calcular la probabilidad de colisión de columnas centrales, columnas laterales y muros en función de las dimensiones de dichos elementos y del bloque caído (figura 4-4).

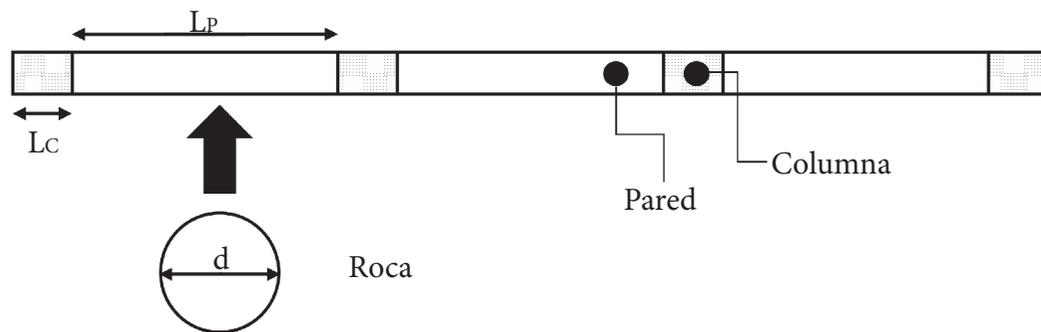


Figura 4-4. Configuración de la fachada tipo de una edificación en concreto reforzado.

$$P_{ccl} = \min\left(\frac{2}{3} \frac{l_c + d}{l_c + l_w}, 1\right) \quad (4-12)$$

$$P_{ccc} = \min\left(\frac{1}{3} \frac{l_c + d}{l_c + l_w}, 1\right) \quad (4-13)$$

$$P_{cm} = \min\left(\frac{l_w + d}{l_c + l_w}, 1\right) \quad (4-14)$$

Donde

P_{ccl} es la probabilidad de colisión de una columna lateral.

P_{ccc} es la probabilidad de colisión de una columna central.

P_{cm} es la probabilidad de colisión de un muro.

l_c es el ancho promedio de las columnas.

l_w es el largo promedio de los muros.

d es el diámetro promedio del bloque caído.

4.5.3.2 Definición del índice de daño (ID)

Se define a partir de las distancias de viaje y de la energía cinética de los bloques caídos a través de su trayectoria, contando el número de columnas para las cuales se supera la energía de falla. De esta manera, el índice de daño se calcula así (ecuación 4-15):

$$ID = \frac{\text{número de elementos estructurales primarios fallados}}{\text{número total de elementos estructurales primarios}} \quad (4-15)$$

A partir del índice de daño (ID) se calcula el costo relativo de reparación (RRC), de acuerdo con la figura siguiente (figura 4-5).

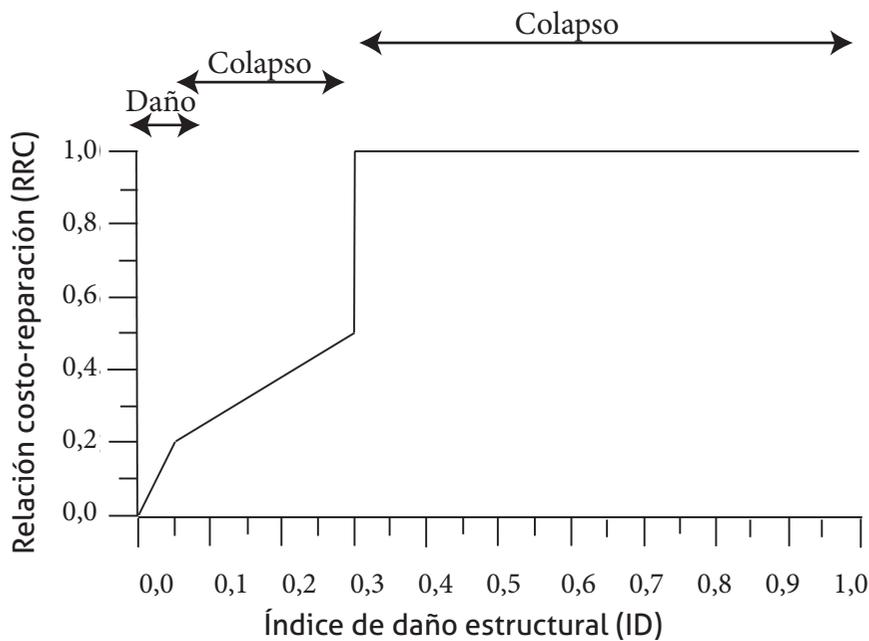


Figura 4-5. Costo relativo de reparación en función del índice de daño (ID).

4.5.3.3 Cálculo de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad se calcula con base en el costo relativo de daño y la probabilidad de colisión de acuerdo con las ecuaciones siguientes (4-16 y 4-17):

$$V = \sum_{k=1}^k (P_{e,k} \times RRC_k) \leq 1,0 \quad (4-16)$$

$$V = P_{ccl}RRC_{cl} + P_{ccc}RRC_{cc} + P_{cm}RRC_w \leq 1,0 \quad (4-17)$$

4.6 Cálculo y zonificación de vulnerabilidad

Siguiendo la metodología desarrollada por Uzielli et al. (2008), Li et al. (2010) y Du et al. (2013), la vulnerabilidad es función de la fragilidad de las estructuras (denominada suscep-

tibilidad en algunos documentos y resistencia en otros) y de la intensidad del evento amenazante. Para esta guía se adopta el modelo de Du et al. (2013) y Du et al. (2014), definido por la ecuación (4-18) y representado gráficamente (figura 4-6).

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{I}{1-S} \right)^2 & I \leq 1 - S \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1-I}{S} \right)^2 & I > 1 - S \end{cases} \quad (4-18)$$

Donde

V es la vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza.

I es la intensidad del evento.

S es la fragilidad del elemento expuesto.

Para estructuras, 1,0 significa la destrucción completa de la estructura; los valores menores que 1,0 representan el grado de daño, y 0 significa que la edificación no presenta ningún daño. En personas, 1 significa la pérdida de la vida, y los valores menores que 1 se traducen como la probabilidad de pérdida de la vida. A continuación se presentan curvas de vulnerabilidad para diversos valores de intensidad y de fragilidad (figura 4-6), según la ecuación (4-18).

Para personas, el valor de fragilidad calculado mediante la ecuación (4-4) se relaciona con la intensidad del evento de acuerdo con la ecuación (4-18), para el cálculo final de la vulnerabilidad.

Así mismo, se determinan tres niveles de daño para edificaciones y líneas vitales con fines de zonificación de la vulnerabilidad. Para edificaciones, los niveles de daño definidos, basados en Hazus (1999), Roca (2004), Mouroux et al. (2001), Vacareanu et al. (2004) y D'Ayala et al. (2013), se presentan a renglón seguido (tabla 4-26). Dichos valores numéricos de vulnerabilidad permiten definir cualitativamente los daños esperados para los elementos expuestos (tabla 4-27).

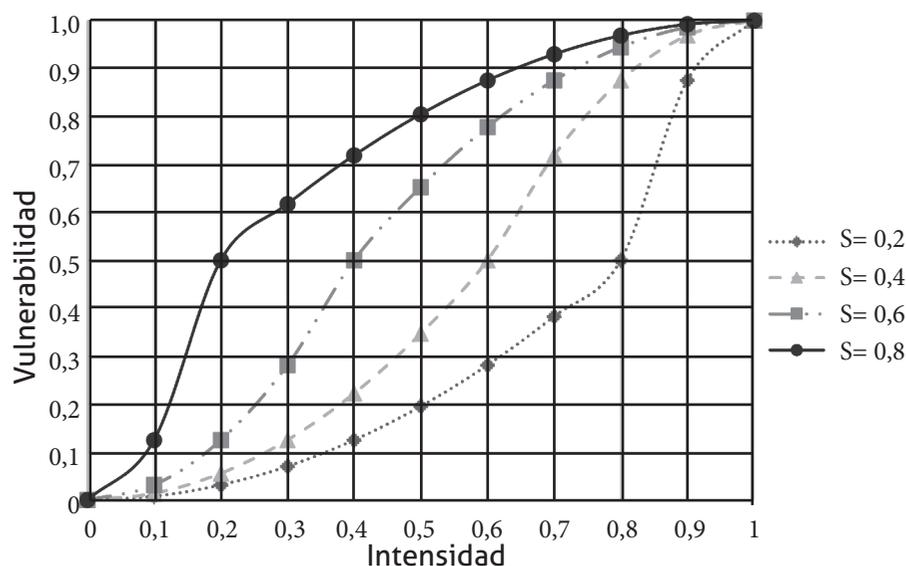


Figura 4-6. Curvas de fragilidad de elementos expuestos.

Fuente: Du et al., 2013.

Tabla 4-26. Clasificación de la vulnerabilidad para edificaciones y líneas vitales

CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	VALOR DE VULNERABILIDAD	NIVEL DE DAÑO
ALTA	0,50-1,00	Total–colapso
MEDIA	0,10-0,50	Grave
BAJA	0,02-0,10	Moderado
	0,00-0,02	Leve

Tabla 4-27. Daños esperados para edificaciones y líneas vitales

CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	EDIFICACIONES	RED VIAL	REDES DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO	REDES ELÉCTRICAS Y DE TELECOMUNICACIONES
ALTA	Colapso parcial o total de la estructura. Rotura de muros. Destrucción total de acabados y accesorios.	Bloqueo total de la vía. Se afecta totalmente el tránsito de vehículos.	Rotura inminente de las tuberías. Interrupción del servicio. Es necesario reconstruir el tramo de la red.	Los postes son derribados o fragmentados. Las líneas de tensión se ven afectadas y se interrumpe el servicio.
MEDIA	Grietas anchas y profundas. Plasticación local de los elementos estructurales. Posible colapso de elementos no estructurales. Daños en los muros. Daño grave de acabados.	Parte del volumen deslizado reposa sobre la vía. Los vehículos pasan con dificultad.	Las tuberías se afectan e incluso se pueden romper. El servicio se ve disminuido. Es necesario reparar la red luego del evento.	Los postes son alcanzados por la masa deslizada, induciendo desplazamientos o inclinaciones en los postes sin comprometer las líneas de tensión y sin interrumpir el servicio.
BAJA	Grietas grandes y profundas. Daños graves en elementos no estructurales. Quiebre de ventanas. Entrada de material a la edificación. Daños en pisos. Grietas pequeñas. Despegues de pequeños pedazos de pañete, despegue de algunos ladrillos.	No existe material sobre la vía o el material que alcanzó la vía es fácilmente evadible por los vehículos.	Las tuberías se desplazan levemente, sin sufrir daños y sin afectar el servicio.	Los postes no son alcanzados por la masa del deslizamiento o son alcanzados con una energía de impacto baja que no les induce desplazamientos o daños.

Con base en los valores de vulnerabilidad definidos (tabla 4-26) se preparará un mapa en el que se identifiquen y clasifiquen los elementos expuestos, de acuerdo con la clasificación de la vulnerabilidad correspondiente. La vulnerabilidad alta se identificará con color rojo, la vulnerabilidad media con color amarillo y la vulnerabilidad baja con color verde.

Por su parte, las categorías de vulnerabilidad para personas en edificaciones basadas en Li et al. (2010), Du et al. (2013) y Coburn (2002, en Du et al., 2013) se pueden definir así (tabla 4-28).

Tabla 4-28. Clasificación de la vulnerabilidad para personas

CLASIFICACIÓN	RANGO DE VULNERABILIDAD	DESCRIPCIÓN
ALTA	0,5-1	Alta posibilidad de muerte o lesiones serias.
MEDIA	0,2-0,5	Alta posibilidad de lesiones moderadas, pero baja probabilidad de muertes.
BAJA	0-0,2	Probabilidad de muerte casi nula y lesiones muy leves o inexistentes.

Los procedimientos hasta aquí indicados permiten definir unos valores numéricos de vulnerabilidad tanto física como de personas, los cuales se pueden plasmar en mapas que se cruzarán posteriormente con los mapas de amenaza.



CÁLCULO DEL RIESGO

CAPÍTULO CINCO

5. Cálculo del riesgo

En razón de que el riesgo está relacionado con la probabilidad de que se causen efectos adversos y consecuencias negativas en los contextos material, social y ambiental, existe una necesidad implícita en la toma de decisiones de desarrollar análisis que permitan su estimación cuantitativa. Estos análisis pueden llevarse a cabo, por ejemplo, en forma determinística, de modo que la estimación del impacto probable se hace con base en un solo evento o escenario o aleatoriamente, integrando el análisis de escenarios múltiples, cada uno con una frecuencia de ocurrencia dada, para obtener así una estimación genérica del riesgo (Yamín et al., 2013).

Las cuantificaciones son claves, puesto que permiten hacer determinaciones de una manera objetiva y reproducible, con resultados que se pueden comparar en distintas zonas; más aún, ayudan a identificar vacíos en los datos de entrada y las posibles debilidades o falencias de los análisis empleados. La cuantificación es también útil para gestión del riesgo, debido a que permite integrar análisis de costo-beneficio y proporciona la base para la priorización de acciones de mitigación y designación de recursos; además, facilita la comunicación entre profesionales, propietarios y tomadores de decisiones (Corominas et al., 2013).

Resulta indispensable, por tanto, determinar tanto el riesgo específico debido a un proceso de inestabilidad como el riesgo total a causa de la suma de todos los procesos posibles (o probables). Analíticamente, el riesgo específico se puede describir así (ecuación 5-1):

$$R_s = P(H_i) * V * E \quad (5-1)$$

Donde

R_s es riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad (H_i), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado.

$P(H_i)$ es amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, con una magnitud o intensidad específica (H_i) en un tiempo dado y en un área específica.

V es vulnerabilidad del elemento expuesto o la proporción de E probablemente afectada en forma negativa por el evento de magnitud (H_i) expresada en una escala entre 0 y 1.

E es el valor total o costo de los elementos físicos expuestos o amenazados por el movimiento en masa; para el caso de personas, E = máximo número de personas expuestas (que ocupan las edificaciones).

El indicador de riesgo más empleado y de fácil incorporación en la planificación territorial es la pérdida anual esperada (Yamín et al., 2013), por lo que se debe hacer el cálculo del riesgo en cuanto a la probabilidad de falla anual para el caso de la amenaza y la valoración económica de los elementos expuestos según su valor presente (VP) en pesos (\$); para personas se puede usar el indicador de número de personas por predio o número de personas por metro cuadrado de construcción.

Considerando la suma de los riesgos específicos para todo tipo de eventos y magnitudes potenciales, se puede describir el riesgo total (Lee & Jones, 2004) (ecuación 5-2):

$$R = \sum R_s (\text{eventos } 1, \dots, n) \quad (5-2)$$

5.1 Pérdidas económicas directas o indirectas. Cálculo del riesgo

Dado que en la evaluación del riesgo se consideran criterios y juicios de decisión, es necesario evaluar los posibles impactos que a corto, mediano y largo plazo pueden generar los movimientos en masa sobre los elementos expuestos.

En compatibilidad con los componentes de la vulnerabilidad descritos, los movimientos en masa pueden producir efectos directos o a corto plazo, ocasionados por la acción directa e inmediata del evento adverso sobre los elementos expuestos e indirectos, que corresponden a aquellos que se derivan de los efectos directos y se materializan a mediano o largo plazo (Yamín et al., 2013).

Según Lee & Jones (2004), las pérdidas económicas directas e indirectas asociadas con tales efectos son aquellas que se pueden estimar en términos económicos o monetarios, debido a que es posible establecer un valor comercial de los elementos. Algunos de los impactos que se pueden considerar para la estimación de pérdidas directas o indirectas se presentan en la tabla siguiente (tabla 5-1).

Para el caso de esta guía, la estimación de pérdidas económicas se referirá únicamente a pérdidas en bienes físicos.

Tabla 5-1. Impacto de los movimientos en masa sobre los elementos expuestos

IMPACTOS	ELEMENTOS	
	BIENES FÍSICOS	PERSONAS
Directos o a corto plazo	Daños en componentes <ul style="list-style-type: none"> • Construcciones • Infraestructura • Instalaciones y equipos • Contenidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Víctimas • Heridos, traumas • Personas sin hogar • Personas sin trabajo
Indirectos o a largo plazo	<ul style="list-style-type: none"> • Interrupción de servicios • Efectos en la producción • Servicios • Consecuenciales • Efectos en sistemas • Contaminación 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de resiliencia • Empobrecimiento • Calidad de vida • Desarrollo humano • Enfermedades

Fuente: Adaptado de Yamín et al., 2013.

A causa de la dificultad y complejidad que representa calcular todos los efectos económicos de los movimientos en masa sobre los elementos expuestos, hay una tendencia a restringir la evaluación de pérdidas solo a la estimación de pérdidas directas. Esta restricción implica la exclusión de costos secundarios relacionados con interrupción de transporte,

servicios, contaminación, etc., además del planteamiento de límites temporales y espaciales, considerando solo los efectos durante la ocurrencia del evento y únicamente sobre los límites físicos de los movimientos en masa (Lee & Jones, 2004).

Para la cuantificación de pérdidas directas en bienes físicos se pueden utilizar criterios tales como costos de remplazo, costos de reparación o mantenimiento y costos del contenido de las edificaciones. Para la cuantificación de pérdidas indirectas se pueden incluir costos por interrupción de transporte y servicios, pérdida de producción, bienes manufacturados, pérdida de negocios, costos de limpieza, contaminación de agua o tierra y costos por enfermedad y desempleo.

En el marco de esta guía, se proponen los siguientes indicadores para la estimación de pérdidas en bienes físicos:

- Valor comercial por unidad de área del terreno (valor unitario del metro cuadrado de terreno).
- Valor comercial por unidad de área de la construcción (valor unitario del metro cuadrado de construcción).
- Actividad comercial o industrial.
- Producto interno por sectores.
- Estadísticas de transporte y comercio interno para vías.
- Cubrimiento de servicios públicos.
- Número de usuarios de servicios públicos.
- Usuarios del sector de la salud.
- Estrato socioeconómico (por manzanas).

Para personas que ocupan edificaciones:

- Población total.
- Población laboral.
- Empleados de sectores comerciales o industriales y públicos.
- Estudiantes por planteles educativos.
- Distribución de la densidad poblacional por metro cuadrado de construcción por manzana.
- Distribución de la densidad de la población por metro cuadrado de terreno por manzana.
- Densidad poblacional por manzana (hab./km²).

Como lo proponen Ingeocim (2002) y Yamín et al. (2013), hay que normalizar algunos indicadores, por ejemplo, por el área de estudio o por la población considerada.

La mayoría de los indicadores propuestos se pueden evaluar para calcular pérdidas directas o indirectas; no obstante, el criterio para la elección del indicador y el cálculo del riesgo asociado depende del juicio de quien ejecuta el estudio de riesgo.

Ejemplos detallados del cálculo del riesgo en bienes físicos y personas se pueden encontrar en Lee & Jones (2004) y Fell et al. (2005). Dado que los escenarios de evaluación varían dependiendo de la especificidad de la zona estudiada, estos ejemplos no se deben tomar como definitivos.



EVALUACIÓN DEL RIESGO

CAPÍTULO SEIS

6. Evaluación del riesgo

Una vez culminada la etapa de análisis del riesgo, cuyo resultado se ha presentado en términos cuantitativos, es posible establecer criterios generales para definir las categorías de riesgo y los tipos de intervención y alcances en su reducción, proceso denominado etapa de evaluación del riesgo en este documento (figura 6-1).

Los criterios fijados para la aceptabilidad del riesgo en bienes físicos y personas se basan en comparaciones con estimaciones de pérdidas anuales o en probabilidad de personas afectadas anualmente, en ese orden. De acuerdo con la AGS (2007c) y JAM. (2007), las pérdidas en bienes se pueden calcular como el costo aproximado de daños, definido este como el porcentaje de daño del valor comercial del elemento, incluyendo el terreno y la estructura intacta.

El costo aproximado es un estimado del costo directo de daño en el cual se pueden considerar, entre otros, el costo de reintegro de la parte afectada (terreno más estructura), trabajos de estabilización requeridos para llevar el riesgo a un nivel tolerable de acuerdo con la amenaza potencial, honorarios de profesionales, diseño de medidas y costos indirectos, tales como honorarios y alojamiento temporal. En la tabla siguiente se presenta el criterio para la valoración del costo aproximado de daño (tabla 6-1).

Una vez calculado el riesgo anual y comparado con el costo aproximado de daños (tabla 6-1), se pueden generar las categorías de riesgo en bienes físicos.

Tabla 6-1. Estimación del costo aproximado de daño

COSTO APROXIMADO DE DAÑO (%)	DESCRIPCIÓN
VALOR INDICATIVO	
200	Estructura completamente destruida o con daños a gran escala que requieren trabajos de ingeniería para recuperación. Pueden causarse daños importantes en propiedades adyacentes.
60	Daños extensivos en la mayoría de la estructura o se extiende más allá de los límites del sitio que requieren obras significativas de recuperación. Se pueden causar por lo menos consecuencias considerables a estructuras adyacentes.
60	Daños moderados en alguna parte de la estructura o parte significativa que requiere grandes trabajos de recuperación. Se puede causar por lo menos consecuencias menores a propiedades adyacentes.
20	Daños limitados en parte de la estructura que requieren algún trabajo para restablecer su funcionalidad.
20	Daños menores (para eventos de alta probabilidad, esta categoría se puede subdividir a un límite entre valores de 0 y 1 %).
0	

Fuente: Adaptada de AGS, 2007c.

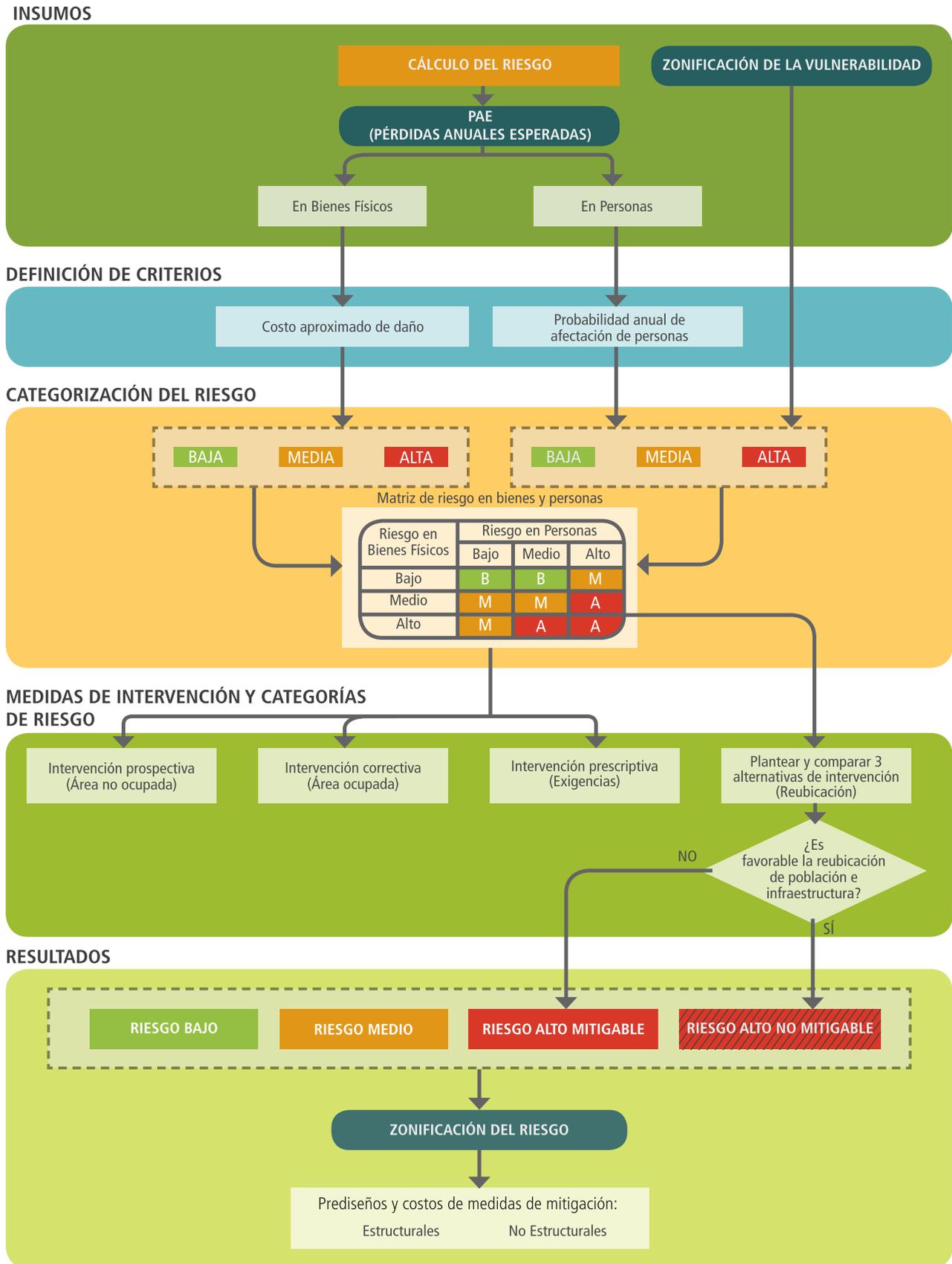


Figura 6-1. Esquema metodológico para la evaluación de riesgo.

Para personas, los criterios de afectación se pueden definir en función de la probabilidad anual de afectación y la categoría de vulnerabilidad indicativa de muertes o lesiones (tabla 6-2).

Tabla 6-2. Criterios de afectación de personas

PROBABILIDAD ANUAL DE AFECTACIÓN DE PERSONAS	DESCRIPCIÓN
$>10^{-4}$	Alta
$10^{-4} - 10^{-5}$	Media
$<10^{-5}$	Baja

Fuente: Adaptada de AGS, 2007a.

6.1 Categorización del riesgo

Establecidos los criterios para determinar los costos aproximados de daño y el grado de afectación de personas, se procede a categorizar el riesgo y a definir posibles medidas de intervención y reducción del riesgo. En este caso, se propone categorizar el riesgo de bienes físicos y personas por separado (en alto, medio y bajo), para luego integrar los dos resultados en la definición final del riesgo. Asociadas a cada categoría se plantean algunas medidas de intervención o reducción. En el caso de la categoría de riesgo alto, se plantea adicionalmente la evaluación con medidas de intervención o estrategias de gestión, con el propósito de definir su viabilidad técnica, financiera y urbanística.

Para bienes físicos, se propone emplear la tabla 6-3, basada en la tabla 6-2.

Tabla 6-3 Categorización del riesgo de bienes físicos

COSTO APROXIMADO DE DAÑO	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
200 – 60%	ALTO	Riesgo inaceptable. Es necesaria la ejecución de investigaciones detalladas, planeación e implementación de medidas para reducir el riesgo. Las medidas de intervención estructural pueden ser dispendiosas y poco prácticas; además, pueden ser más costosas que el valor mismo de la propiedad.
60 – 20%	MEDIO	Puede tolerarse en ciertas circunstancias (de acuerdo con la regulación estatal), pero requiere investigación y planeación detallada para evitar que aumente. Las medidas para reducir el riesgo son viables económicamente.
20 – 0%	BAJO	Usualmente aceptable para los tomadores de decisiones. Se requiere mantenimiento normal de taludes y laderas.

Para personas se propone utilizar la tabla 6-4, de categorización de riesgo, basada en la tabla 6-2, y las categorías de vulnerabilidad presentadas en el capítulo anterior.

Tabla 6-4. Categorización de riesgo

PROBABILIDAD ANUAL DE AFECTACIÓN DE PERSONAS	TIPO DE AFECTACIÓN		
	MUERTES O LESIONES SERIAS	LESIONES MODERADAS Y BAJA PROBABILIDAD DE MUERTE	LESIONES LEVES O INEXISTENTES
ALTA	ALTO	ALTO	BAJO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	MEDIO	BAJO	BAJO

Las categorías de riesgo de bienes físicos y personas se deben combinar para establecer el riesgo total (tabla 6-5).

Tabla 6-5. Categorías de riesgo de bienes físicos y personas

RIESGO EN BIENES FÍSICOS	RIESGO EN PERSONAS		
	ALTO	MEDIO	BAJO
ALTO	A	A	A
MEDIO	A	M	M
BAJO	A	B	B

La descripción de las categorías de riesgo total se presenta a renglón seguido (tabla 6-6). Para la categorización final, se deben sumar los riesgos individuales para todos los eventos en personas o edificaciones.

Tabla 6-6. Descripción de las categorías de riesgo total

CATEGORÍA		DESCRIPCIÓN
A	ALTO	Alta probabilidad de víctimas fatales y lesiones serias en la población. La implementación de medidas de intervención es prácticamente inviable desde el punto de vista técnico. Se debe hacer una evaluación económica detallada para establecer la posibilidad de mitigación y disminución del nivel de riesgo. Las pérdidas por materialización de la amenaza superan en todos los casos los valores económicos de los bienes.
M	MEDIO	Lesiones moderadas muy frecuentes, con alguna probabilidad de víctimas fatales. Se requiere evitar que el nivel de riesgo aumente, pero las medidas de intervención son en todo caso viables técnica y económicamente.
B	BAJO	Probabilidad de víctimas fatales prácticamente nula. Es un riesgo aceptable y requiere tan solo medidas de prevención.

6.2 Medidas de intervención y categorías del riesgo

En el numeral anterior se presentaron brevemente algunas medidas de intervención, de acuerdo con las categorías de riesgo definidas. Con arreglo a la terminología descrita al inicio de este documento y presentada en la Ley 1523 de 2012, es posible plantear medidas de

intervención prospectiva, correctiva y prescriptiva para cada categoría de riesgo, basadas en la propuesta de riesgo implícito presentada por Mendes (2013) –citado por Cardona (2013). En todo caso, para la categoría de riesgo alto hay que evaluar medidas de intervención específicas con el objeto de definir su categoría final en riesgo alto mitigable o riesgo alto no mitigable. Si bien la propuesta de Mendes (2013) –citado por Cardona (2013)– está basada en el cálculo del riesgo implícito, puede adaptarse como un primer panorama de planteamiento de medidas de mitigación del riesgo (tabla 6-7).

Tabla 6-7. Intervenciones y categorías de riesgo

CATEGORÍA DE RIESGO	INTERVENCIÓN PROSPECTIVA (ÁREA NO OCUPADA) A	INTERVENCIÓN CORRECTIVA (ÁREA OCUPADA) B	INTERVENCIÓN PRESCRIPTIVA (EXIGENCIAS)
ALTO	Prohibición de asentamientos e infraestructura	Reubicación de asentamientos e infraestructura, evaluación económica de la reducción del riesgo + sistemas de alerta	Reducir la amenaza y evaluar económicamente las intervenciones.
MEDIO	Controlar el aumento del riesgo + sistemas de alerta	Protección del área + sistemas de alerta	Controlar el aumento de la amenaza (A) y proteger el área (B).
BAJO	Controlar el aumento de la amenaza y prevenir el aumento del riesgo	Sin condicionantes	Controlar el aumento de la amenaza (A).

Fuente: Adaptado de Mendes, 2013, en Cardona, 2013.

6.3 Riesgo alto mitigable o no mitigable

Luego de definir las zonas de alto riesgo, se requiere una evaluación adicional con el propósito de definir la viabilidad de mitigación del riesgo en estas zonas.

Siguiendo los lineamientos presentados en la legislación vigente (Decreto 1807 de 2014), metodológicamente se propone plantear por lo menos tres opciones de intervención física (estructural y no estructural) para reducir y evitar el incremento del riesgo. Estas opciones se deben evaluar de acuerdo con criterios de viabilidad técnica, financiera y urbanística, y en todos los casos se han de dirigir a disminuir la categoría de riesgo alto a riesgo medio. Así, se proponen las siguientes evaluaciones:

- Calcular los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura, aparte de los costos o pérdidas por prohibición de asentamientos y costos de obras para controlar la influencia de los eventos en áreas ocupadas.
- Hacer una evaluación económica detallada de la reducción del riesgo en áreas ocupadas, por medio del planteamiento de dos medidas de intervención distintas de la anterior.
- Transferir el costo de reducción del riesgo para el desarrollo de infraestructura en áreas no ocupadas.

Los análisis de transferencia del riesgo y estrategias de protección financiera exceden los alcances de esta guía. Al respecto, se recomienda revisar los documentos de Cardona (2005 y 2013).

En lo que tiene que ver con las evaluaciones económicas para reducir el riesgo en áreas ocupadas, se proponen las siguientes opciones, basadas en Lee & Jones (2004):

- Aproximaciones a partir de comparaciones entre la situación actual y la situación con medidas de mitigación.
- Aproximaciones económicas a partir de beneficios obtenidos por reducir el riesgo.

La primera es una aproximación simple, que consiste en comparar el riesgo anual entre la situación actual y lo que se espera que ocurra con la medida de mitigación propuesta. Es decir:

$$\text{Riesgo} = P * V * E \text{ (condición actual)} \quad (6-1)$$

$$\text{Riesgo} = P * V * E \text{ (con la medida de mitigación)} \quad (6-2)$$

Se pueden plantear varios escenarios, por ejemplo, disminuyendo la probabilidad de falla con el planteamiento de medidas estructurales o reduciendo la vulnerabilidad al cambiar las condiciones de exposición o fragilidad de las estructuras. Los escenarios de mitigación planteados se evalúan a la luz del criterio presentado con anterioridad (tabla 6-7).

En una aproximación más adecuada se considera la siguiente comparación:

$$\text{Beneficios de mitigación} = \text{riesgo 'sin intervención'} - \text{riesgo 'con intervención'}$$

Tal comparación simple se debe anualizar, igualmente, para todo el periodo de diseño de la medida de intervención; esto significa que, por ejemplo, para obras de estabilización, el riesgo se reduce cada año por todo el periodo de diseño de la obra. Por lo general, en intervenciones estructurales los mayores costos se presentan en el tiempo de construcción (año cero); los costos de mantenimiento y reparación deben contemplarse, obviamente, en el periodo de diseño de la obra.

Como ya se mencionó, para cualquier comparación económica o monetaria es necesario expresar el riesgo futuro en términos del valor presente (VP). El VP del riesgo para un determinado año se puede calcular así (ecuación 6-3):

$$\text{VP del riesgo (año T)} = \text{Factor de depreciación} * \text{probabilidad de falla para el año T} * \text{pérdidas totales} \quad (6-3)$$

Si se considera que el evento ocurre una sola vez en el periodo de diseño de la obra, se puede calcular la probabilidad como:

$$P(\text{evento, año } T) = \text{Probabilidad anual} \times (\text{prob. de que el evento no haya ocurrido en el año } T-1) \quad (6-4)$$

Una vez calculados los beneficios económicos de la mitigación, se deben comparar con los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura, para definir la mitigabilidad del riesgo en las zonas analizadas. Todas las evaluaciones y comparaciones económicas se deben hacer en términos del valor presente (VP) de costos o pérdidas anuales para el tiempo de intervención considerado. En estas evaluaciones hay que tener presente que la restricción o regulación del uso del suelo puede disminuir o aumentar las pérdidas a largo plazo, de acuerdo con las características ambientales y con el plan de desarrollo del municipio.

Cuando los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura excedan los costos de las dos medidas de intervención propuestas, se considera que el riesgo es mitigable. Si, por el contrario, los beneficios de la reubicación de asentamientos e infraestructura representan la mejor opción económica, se deduce que el riesgo es no mitigable.

6.4 Zonificación del riesgo

Al final del proceso de evaluación es necesario presentar los resultados mediante un mapa de zonificación de riesgo. Las zonas de riesgo bajo y medio se definen conforme a la tabla siguiente (tabla 6-8). Las zonas de riesgo alto se presentan diferenciadas en riesgo alto mitigable y no mitigable, de acuerdo con los criterios presentados anteriormente. Para este efecto se propone conservar los colores rojo, amarillo y verde para las zonas de riesgo alto, medio y bajo, en ese orden, diferenciando con una simbología de achurado las zonas de riesgo alto mitigable y no mitigable (tabla 6-8).

Tabla 6-8. Categorías de riesgo

COLOR	CATEGORÍA
	Alto no mitigable
	Alto mitigable
	Medio
	Bajo



RECOMENDACIONES

CAPÍTULO SIETE

7. Recomendaciones

7.1 Presentación de resultados

Un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala de detalle debe incluir un resumen ejecutivo, dirigido a los tomadores de decisiones y a la comunidad en general, en el que se señalen los aspectos más importantes del estudio, así como sus resultados, conclusiones y recomendaciones, al igual que un informe final que contenga los capítulos que se describen a continuación, con los mapas y anexos.

Capítulo 1. Generalidades

En este capítulo se incluye la información geográfica, climatológica y física, así como demás descripciones básicas del municipio y de las zonas de estudio que puedan ser determinantes para el análisis del riesgo por movimientos en masa, al igual que un análisis de los informes previos y la información secundaria de la revisión de antecedentes.

Capítulo 2. Información base

En este capítulo se incluye la información primaria adquirida para la realización del estudio, al igual que las metodologías de recolección empleadas. Dentro de esta información hay que detallar, como mínimo, la metodología de obtención, el análisis efectuado y los productos resultantes de estos procesos:

- Cartografía básica
- Geomorfología
- Geología para ingeniería
- Agua subsuperficial
- Sismología
- Cobertura y uso del suelo

Capítulo 3. Análisis de amenaza

Se recomienda incluir en este capítulo los análisis efectuados y resultados obtenidos para la zonificación geotécnica a escala 1:5000, incluyendo un numeral de zonificación geotécnica a esta escala, y a escala 1:2000, incluyendo los numerales en los que se detallan los escenarios de amenaza, los factores detonantes considerados y sus magnitudes, la construcción del modelo geotécnico, los análisis y cálculos para determinar la probabilidad de falla y la zonificación de la amenaza resultante de dichos análisis.

Capítulo 4. Análisis de vulnerabilidad

En este capítulo se deberá incluir el procesamiento de la información levantada en campo, tendiente a identificar y caracterizar los elementos expuestos, calcular la fragilidad de dichos elementos, los escenarios de vulnerabilidad considerados, así como la valoración y zonificación de la vulnerabilidad.

Capítulo 5. Análisis del riesgo

En este capítulo se incluyen el cálculo del riesgo a partir de los análisis de amenaza y vulnerabilidad, y la evaluación y zonificación del riesgo a partir de los criterios definidos. Así mismo, habrá que incluir un análisis básico de las medidas y planes de mitigación estructural y no estructural, al igual que la definición del riesgo mitigable y no mitigable.

Mapas y anexos

El informe final se habrá que complementar con los anexos, en los cuales se incluirán los planos producidos en el estudio, las columnas con la descripción de las perforaciones, los ensayos de laboratorio efectuados, los perfiles geológicos utilizados en los análisis y los formatos de toma de información en campo debidamente diligenciados. Entre los planos, hay que presentar los siguientes:

- Mapa de elementos geomorfológicos a escalas 1:5000 y 1:2000
- Mapa de geología para ingeniería a escalas 1:5000 y 1:2000
- Mapa de cobertura y uso del suelo a escala 1:5000
- Mapa de zonificación geotécnica a escalas 1:5000 y 1:2000
- Mapa de zonificación de amenaza a escalas 1:5000 y 1:2000
- Mapa de zonificación de vulnerabilidad a escala 1:2000
- Zonificación de riesgo a escala 1:2000

La estructura y el almacenamiento de la información cartográfica se harán de acuerdo con los *geodatabase* definidos por las entidades oficiales nacionales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Servicio Geológico Colombiano, ministerios), las autoridades o corporaciones regionales, o las autoridades locales, de acuerdo con los requerimientos de la institución contratante de los estudios. Se recomienda emplear la estructuración de datos definida por las entidades de orden nacional para universalizar la presentación de la información y los resultados.

Los formatos de presentación (encabezado, rótulo, orígenes cartográficos, información de referencia, localización, notas, convenciones, etc.), la simbología y la memoria explicativa deberán, conforme a los requerimientos de la institución contratante, estar en concordancia con los estándares definidos por entidades oficiales nacionales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Servicio Geológico Colombiano, ministerios), las autoridades o corporaciones regionales, o las autoridades locales. Se recomienda utilizar estándares de orden nacional para garantizar la presentación homogénea de la información y los resultados.

Los metadatos del proyecto deberán contener la información mínima dispuesta en la NTC4611:2011.

Las leyendas descriptivas de los mapas de zonificación de vulnerabilidad y riesgo se basan en las descripciones dadas en los capítulos correspondientes, con las modificaciones y aclaraciones a que haya lugar. La leyenda para el mapa de amenazas la definirán los profesionales encargados de la evaluación de la amenaza, de acuerdo con los escenarios considerados.

Tanto el informe como cada uno de los planos los deberán firmar los profesionales matriculados y facultados que cumplan con los requisitos indicados en este capítulo, que hayan participado en el estudio, indicando las actividades generales realizadas por cada profesional.

7.2 Perfil de profesionales

El análisis de los movimientos en masa requiere conocimientos y experiencia específica en diferentes disciplinas. Los equipos de trabajo deben incluir como mínimo profesionales con educación, formación y experiencia en geología, geomorfología, hidrología e hidrogeología, fotointerpretación, ingeniería civil, mecánica de suelos y rocas, estructuras, análisis de estabilidad de taludes, así como análisis de amenaza y riesgo por movimientos en masa. La formación de estos profesionales debe estar acreditada por una institución educativa apropiada y por el consejo profesional que regule la actividad en el país.

Dependiendo de la complejidad del área de estudio, pueden incluirse también profesionales con conocimiento y experiencia en geología del cuaternario, geología estructural, petrología, sedimentología, mitigación y remediación, geofísica e investigación del subsuelo, patrimonio, economía, trabajo social, etc.

Tomando como base los temas abordados en cada una de las etapas del proceso de evaluación del riesgo y considerando regulaciones locales como la de Bogotá para la ejecución de estudios de riesgo por remoción en masa, se recomienda que el perfil profesional de los ejecutores y revisores de los estudios llene los requisitos que se enumeran a continuación:

Los profesionales que realicen, revisen o supervisen los estudios de geología, geomorfología e hidrogeología deben tener título profesional en geología o ingeniería geológica o similares, con experiencia profesional certificada superior o igual a cinco años y experiencia específica de mínimo dos años en temas relacionados con cartografía geológica, geomorfológica e hidrogeológica a escala detallada con fines ingenieriles.

Los profesionales que realicen, revisen o supervisen los análisis hidrológicos e hidráulicos necesarios para el análisis de los movimientos en masa deben tener título profesional en ingeniería civil o ambiental, de preferencia con estudios de posgrado en hidrología, hidráulica o similares, con experiencia profesional certificada superior o igual a cinco años.

Los profesionales que realicen, revisen o supervisen los análisis de antecedentes históricos, de evaluación de procesos de inestabilidad y de cuantificación de la amenaza y riesgo por movimientos en masa deben tener título profesional en geología, ingeniería geológica, ingeniería civil o similares, con título de posgrado en geotecnia o evaluación de riesgos por movimientos en masa, con experiencia profesional específica mínima de cuatro años en evaluación de riesgos geológico-geotécnicos.

Los profesionales que realicen, revisen o supervisen los análisis para la cuantificación de la vulnerabilidad deben tener título de ingeniería geológica, ingeniería civil o similar, con título de posgrado en geotecnia o estructuras, con experiencia profesional específica mínima de cuatro años en evaluación de patología estructural o proyectos de evaluación de riesgo.

Los profesionales que realicen, revisen o supervisen los diseños de las obras deben tener título profesional en ingeniería civil o similar, con estudios de posgrado en estructuras o geotecnia, según sea el caso, y experiencia profesional certificada mayor de cinco años en análisis y diseños de este tipo de obras.

Los profesionales que realicen, revisen o supervisen las medidas no estructurales de reducción del riesgo deben tener título profesional en ingeniería, ciencias sociales, ciencias políticas, administración, urbanismo y afines, con formación en gestión de riesgos y experiencia profesional certificada mayor de cinco años en medidas no estructurales de reducción del riesgo.

En el caso de que los revisores o supervisores de los estudios no reúnan los requerimientos establecidos previamente, deberá tratarse por lo menos de geólogos, ingenieros civiles, ingenieros geólogos o similares, con título de posgrado en el área específica en que participan y experiencia certificada en la ejecución de este tipo de estudios no inferior a tres años, contados a partir de la fecha de obtención del título de posgrado respectivo.

Así mismo, los informes y planos producto del estudio han de estar debidamente firmados tanto por los profesionales matriculados y facultados para este fin como por el consejo profesional respectivo, que cumplan con los requisitos indicados con anterioridad.



REFERENCIAS



Referencias

- Argyroudis, S., Pitilakis, K. & Anastasiadis, A. (mayo de 2005). *Roadway network seismic risk analysis in urban areas: the case of Thessaloniki-Greece*. Ponencia presentada en Proceedings of International Symposium of Geoline.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). *Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009*. Comité AIS-300: Amenaza sísmica. Bogotá: AIS.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). *Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente, NSR-10*. Bogotá: AIS.
- Australian Geomechanics Society (2007a). Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Aust Geomech*, 42(1), 13-36.
- Australian Geomechanics Society (2007b). Commentary on guideline for landslides susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Aust Geomech*, 42(1), 37-62.
- Australian Geomechanics Society (2007c). Practice note guidelines for landslide risk management. *Aust Geomech*, 42(1), 63-114.
- Australian Geomechanics Society (2007d). Commentary on practice note guidelines for landslide risk management. *Aust Geomech*, 42(1), 115-158.
- Australian Geomechanics Society (2007e). The Australian GeoGuides for slope management and maintenance. *Aust Geomech*, 42(1), 159-182.
- Baecher, G. B. & Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering* (1.ª ed.). Chichester: Wiley.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID) & Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) (2005). *Indicadores de riesgo de desastre y gestión de riesgos. Programa para América Latina y el Caribe*. Manizales: BID-IDEA.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, rock mechanics. *Springer-Verlag*, 6, 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S Afr Inst Civ Eng*, 15, 335-342.
- Calvello, M., Cascini, L. & Mastroianni, S. (2013). Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units. *Geomorphology*, 182, 33-48.
- Cardona, O. D. (2013). *Incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial. Instructivo para el nivel municipal*. Parte 1. PRICC-PNUD, piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidrolimáticos en el ordenamiento territorial municipal. Bogotá.
- Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Coburn, A. & Spence, R. (2002). *Earthquake protection*. Nueva York: John Wiley & Sons Ltd.
- Colombia, Congreso de la República. Decreto 1807 de 2014, Reglamentación del artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012.
- Colombia, Congreso de la República. Ley 1523 de 2012, Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 260-271.
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S. & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209-263.
- Cruden, D. M. & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. En A. T. Turner & R. L. Schuster (eds.). *Special Report 247: Landslides: investigation and mitigation*. Washington: Transportation Research Board, National Academy Press, pp. 36-75.
- D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Crowley, H. & Silva, V. (2014). *Guidelines for analytical vulnerability assessment of low- to mid-rise buildings. Methodology* (GEM Technical Report). GEM Foundation.
- Dearman, W. (1995). Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28.
- Díaz-Granados, M. & Puente, X. (septiembre de 2008). Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia a partir de información pluviométrica. *Memorias. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena de Indias, Colombia.
- Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito (DPAE) (31 de agosto de 2000). Términos de referencia para estudios de riesgos por inestabilidad del terreno. *Memorias. Seminario Estudios de Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa*. Bogotá: DPAE.
- Du, J., Yin, K., Lacasse, S. & Nadim, F. (2013). *Quantitative vulnerability estimation for individual landslides*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. París.
- Du, J., Yin, K., Lacasse, S. & Nadim, F. (2013). Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: application to the metropolitan area of San Salvador. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 1251-1264.
- Federal Emergency Management Agency (1999). *Hazus 99 - Technical and user's manual*. Washington.
- Felicísimo, A. M. (1992). *Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en las ciencias ambientales*. Tesis doctoral. Oviedo: Universidad de Oviedo, Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (Indurot).
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Pentalfa.
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S. & Leroi, E. (2005). *A framework for landslide risk assessment and management*. En O. Hungr, R. Fell, R. Couture and E. Eberhardt (eds.). *Landslide Risk Management*. Londres: Taylor and Francis, pp. 3-26.
- González, A. (agosto de 2005). *Evaluación de amenaza por fenómenos de remoción en masa*. III Curso Latinoamericano de Movimientos en Masa. Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotecnia.

- Granados, M. & Puente, X. (septiembre de 2006). *Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia a partir de información pluviométrica*. XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Popayán.
- Granados, M. & Puente, X. (mayo de 2008). *Estimación de curvas IDF con información pluviométrica y distribución Gumbel*. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá.
- Hermelin, M. (1987). *Bases de geología ambiental*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Hoek, E., Wood, D. & Shah, S. (1992). *Modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses*. Proc. I S M Symposium: Eurock '92, Chester. Londres: Thomas Telford Publishing, pp. 209-214.
- Hoek, E. & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 34(8), 1165-1186.
- Hungr, O., Corominas, J. & Eberhardt, E. (2005). State of the Art Paper # 4. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. *Landslides Risk Management*. Proceedings. Vancouver, Canada.
- Ingeocim Ltda. (31 de agosto de 2000). Evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Bogotá, Colombia. *Memorias*. Seminario Estudios de Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas) & Escuela Colombiana de Ingeniería (2001). *Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa. Guía metodológica*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería e Ingeominas.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2010). *Leyenda nacional de cobertura de la tierra. Metodología Corine Land Cover, adaptada para Colombia a escala 1:100.000*. Bogotá: Ideam.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (octubre de 2004). *Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia Magna-Sirgas como datum oficial de Colombia*. Bogotá: IGAC. Subdirección de Geografía y Cartografía, División de Geodesia.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (octubre de 2006a). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Convenio interadministrativo 0587-03. *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Bogotá: Invías-UNAL.
- Instituto Nacional de Vías (Invías) (octubre de 2006b). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Convenio interadministrativo 0587-03. *Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos*. Invías-UNAL.
- International Association for Engineering Geology and the Environment, Commission on Landslides (1990). Suggested Nomenclature for Landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 41, 13-16.
- International Union of Geological Sciences (IUGS) (1997). *Quantitative risk assessment for slopes and landslides – The state of the art*. IUGS Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment. En D. M. Cruden & R. Fell (eds.). *Landslide Risk Assessment*. Rotterdam: Balkema, pp. 3-12.
- JAM Ingeniería y Medio Ambiente E.U. (2007). *Estudio para definir la metodología para la zonificación y reducción de riesgo por FRM, con aplicación a una zona piloto localizada en la cuenca de la quebrada Camelias, en Manizales*. Texto metodología de evaluación de riesgo por FRM a nivel de detalle. Ministerio de Vivienda.

- JTC-1 (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, 85-98.
- Kaynia, A. M., Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H. & Medina-Cetina, Z. (2008). Probabilistic assessment of vulnerability to landslide: application to the village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany. *Engineering Geology*, 101(1), 33-48.
- Lee, E. M. & Jones, D. K. C. (2004). *Landslide risk assessment*. Londres: Thomas Telford Publishing.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M. & Lacasse, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(2), 125-134.
- Linsley, R. K., Kholer, M. A. & Paulus, J. L. (1977). *Hidrología para ingenieros*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Mavrouli, O. & Corominas, J. (2010a). Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 10, 2055-2066.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR-10.
- Ministerio de Desarrollo Económico (1999). *Operación y mantenimiento de redes de acueducto y alcantarillado*. SENA Publicaciones.
- Ministerio de Minas y Energía (2013). Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (Retie). Resolución 90708 del 30 de agosto de 2013. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- PMA: GCA (2007). Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. *Publicación Geológica Multinacional*, 4(432), 1. Servicio Nacional de Geología y Minería, CD-ROM.
- PNUD/Undro (1991). Vulnerabilidad y evaluación de riesgo. Programa de entrenamiento para el manejo de desastres. Cambridge, U.K.: Organización de las Naciones Unidas.
- Pradel, D. & Raad, G. (1993). Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 315-332.
- Ragozin, A. L. & Tikhvinsky, I. O. (2000). Landslide hazard, vulnerability and risk assessment. En E. Bromhead, N. Dixon, M. L. Ibsen (eds.). *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*. Cardiff, pp. 1257-1262.
- Rodríguez P., C. E. & Jiménez J., D. Y. (2009). Vulnerabilidad física ante deslizamientos. *Memorias*. V Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Bogotá, 7, 8 y 9 de mayo. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romana, M. (1985). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Proc Int Symp Rock Mech Excav Min Civ Works. México: ISM, pp. 59-68.
- Russelli, C. (2008). *Probabilistic methods applied to the bearing capacity problem*. Stuttgart: IGS. Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart.
- United Nations Disaster Relief Coordinator (Undro) (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Informe de la reunión del grupo de expertos, 9-12 de julio. Ginebra: Oficina Coordinadora de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre.
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S. & Kaynia, A. M. (2008). A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3), 251-256.

- Valentine, G. A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87(1-4), 117-140. doi: 10.1016/S0377-0273(98)00094-8.
- Van Zuidam, R. (1985). Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphical mapping. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. The Hague. The Netherlands: ITC, Smits Publishers, 442 pp.
- Vargas, R. & Díaz-Granados, M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia. XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Cali.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. En R. L. Schuster & R. J. Krizek (eds.). *Special Report 176: Landslides: analysis and control*. Washington: Transportation Research Board, pp. 11-33.
- Verstappen, H. & Van Zuidam, R. A. (1992). El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. *Publicación ITC*, N.º 10. Villanueva de Huerva.
- Willie, D. C. & Mah, C. W. (2004). *Rock slope engineering. Civil and mining* (4th ed.). Spon Press.
- Yamín, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D. & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastres: el caso de Bogotá, Colombia*. Banco Mundial, Universidad de los Andes.
- Yue, Z. Q. (2014). Dynamics of large and rapid landslides with long travel distance under dense gas expanding power. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, 3. Springer, pp. 233-240.



ANEXOS

ANEXO A

Amenaza

NOMENCLATURA SUGERIDA	NOMBRE DE LA UGI	NOMENCLATURA SUGERIDA	NOMBRE DE LA UGI
SUELOS			
Sa	Suelo antrópico	Stcba	Suelo transportado de ceniza y bloque altamente meteorizado
Sale	Suelo antrópico de llenos de escombros	Stct	Suelo transportado de cono de talus
Sra	Suelo residual de arenisca	Stta	Suelo transportado de terraza alta
Srl	Suelo residual de lutita	Sttm	Suelo transportado de terraza media
Sta	Suelo transportado aluvial	Sttb	Suelo transportado de terraza alta
Stca	Suelo transportado coluvial antiguo	Stf	Suelo transportado fluvio-torrencial
Stco	Suelo transportado coluvial	Stfl	Suelo transportado de flujo de lodo
Stcbm	Suelo transp de ceniza y bloque moderadamente meteorizado	Stfv	Suelo transportado fluviovolcánico
ROCAS			
Rmda	Roca muy dura de arenisca	Rdi	Roca dura de ignimbrita
Ria	Roca intermedia de arenisca	Rbari	Roca blanda arenosa de ignimbrita
Rbl	Roca blanda de lutita	Rbai	Roca blanda arcillosa de ignimbrita
Rmbl	Roca muy blanda de lutita	Rbe	Roca blanda de esquisto

Anexo A-1. Ejemplos de nomenclatura para las UGI.

		CARACTERIZACIÓN DE SUELOS MAPAS DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES - GEOLOGÍA PARA INGENIERÍA FORMATO DE CAMPO																																		
INFORMACIÓN GENERAL																																				
PROYECTO: _____																																				
Departamento _____	Latitud _____	Nombre _____																																		
Municipio _____	Longitud _____	Fecha _____																																		
Vereda _____	Altitud _____	N°. De Estación _____																																		
CLASE DE AFLORAMIENTO		SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA																																		
Natural	<table border="1" style="width: 50px; height: 40px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>					Suelo Antrópico	Si es suelo residual: Horizonte _____ VI (Suelo Residual) _____ V (Saprolito) _____ III, IV (Roca meteorizada) _____																													
Corte superficial	Ordi Espesor (m)	Ordi Espesor (m)																																		
Excavación subterránea	Suelo Residual																																			
Trichera, Apique	Suelo Transportado																																			
Roca																																				
CARACTERIZACIÓN DE LA UGS																																				
Unidad Geológica Superficial _____																																				
No. litologías asociadas a la UGS 1 <input type="checkbox"/> Espesor (m) _____ 2 <input type="checkbox"/> Espesor (m) _____																																				
CARACTERÍSTICAS DE LA UGS																																				
TEXTURA: Clasto-soportado <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Intermedia <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Matriz soportado <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>							HUMEDAD NATURAL: % Matriz <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> % Clastos <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Espesor (m) _____					PERMEABILIDAD CUALITATI: Baja <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Media <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Alta <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>							ESTRUCTURAS Estructuras heredadas* <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Fisuras <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Grietas <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> * Disposición Estructural _____																	
CARACTERÍSTICAS DE LOS CLASTOS																																				
COLOR 1: _____ COLOR 2: _____	FORMA DE LOS CLASTOS Esférica <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Discoidal <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Prismática <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Tabular <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>									REDONDEZ DE LOS CLASTOS Redondeada <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Subredondeada <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Subangular <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Angular <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>									ORIENTACIÓN DE LOS CLASTOS Isotropía <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Anisotropía <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Imbrincado <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>							METEORIZACIÓN DE LOS CLASTOS Fresca <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Débil <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Moderada <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Alta <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Descompuesta <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>										
CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ																																				
GRANULOMETRÍA (%): Arcilla (<0,002 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Limo (0,002 - 0,075 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Arena fina (0,075 - 0,425 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Arena Media (0,425 - 2,0 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Arena gruesa (2,0 - 4,75 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Grava (4,75 - 75,0 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Guijos (75 - 300 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Guijos (75 - 300 mm) <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>																	PLASTICIDAD No plástico <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Poco Plástico <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Plástico <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Muy Plástico <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>									COLOR 1: _____ COLOR 2: _____	PENETRÓMETRO 1 <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> 2 <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Registrar tres lecturas									
SUELOS FINOS		SUELOS GRUESOS																																		
RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA (Consistencia): Muy Blanda <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Blanda <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Media <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Firme <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Dura <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Muy Dura <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>													DENSIDAD RELATIVA DE LOS SUELOS (Compacidad): Suelta <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Densa <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Muy Densa <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>							FORMA DE LOS CLASTOS Esférica <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Discoidal <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Prismática <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Tabular <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>									ORIENTACIÓN DE LOS CLASTOS Isotropía <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Anisotropía <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table> Imbricado <table border="1" style="width: 30px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> <tr><td> </td></tr> </table>							
ANEXOS DEL FORMATO																																				
FOTOGRAFÍAS Foto <table border="1" style="width: 50px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> </table> Descripción _____ Foto <table border="1" style="width: 50px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> </table> Descripción _____ Foto <table border="1" style="width: 50px; height: 20px;"> <tr><td> </td></tr> </table> Descripción _____																																				
OBSERVACIONES <table border="1" style="width: 100%; height: 40px;"> <tr><td> </td></tr> </table>																																				

Anexo A-3.1. Formato para la caracterización del suelos, hoja 1 de 2.

Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa

LOCALIZACIÓN: En coordenadas geográficas MAGNA-SIRGAS, según origen del proyecto.

CARACTERIZACIÓN: Características de la UGS que se va a cartografiar

UNIDAD GEOLÓGICA SUPERFICIAL: Nombre propuesto para la UGS a caracterizar

SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA: Indicar con números la secuencia de materiales encontrados empezando con 1 para el material en superficie y en el segundo campo el espesor en m. Si el suelo es residual completar la 2ª columna

CARACTERÍSTICAS DE LA UGS

TEXTURA:		HUMEDAD:	
TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO	TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO
Clasto-soportado	Textura apretada con clastos entrelazados	Seca	No hay humedad visible
Intermedia	Contactos frecuentes sin entrelazamiento o con puntos ocasionales de contacto entre clastos	Húmeda	Contiene algo de humedad pero no se observa agua libre
Matriz-soportado	Fracción gruesa dispersa en una matriz prevalente	Saturada	Contiene humedad suficiente para comportarse en parte como un líquido, agua visible

POROSIDAD O PERMEABILIDAD CUALITATIVA: Depende en gran medida de la granulometría y la gradación del material

CARACTERÍSTICAS DE LOS CLASTOS

FORMA Y REDONDEZ DE LOS CLASTOS: Las clasificaciones intermedias para redondez no se presentan

FORMA	Esférica					
	Discoidal					
	Prismática					
	Tabular					
	REDONDEZ	Redondeada		Angulosa		

ORIENTACIÓN DE LOS CLASTOS:

TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO
Isotropía	Clastos planos o elongados sin una dirección particular, orientados aleatoriamente o dispersos
Anisotropía	Clastos planos o elongados con la misma orientación paralela a la capa. Registrarse la inclinación.
Imbricado	Clastos planos o elongados que tienen la misma orientación que es diferente de la inclinación de la capa. Registrarse tanto la inclinación de la capa como de los clastos.

CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ

PLASTICIDAD

TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO
No plástico	No se puede formar un cordón
Poco plástico	Se puede formar un cordón, pero se rompe fácilmente y vuelve a su estado anterior
Plástico	Se puede formar un cordón, pero al romperse y volver a su estado anterior, no se puede formar nuevamente.
Muy Plástico	Se puede formar un cordón que no se rompe fácilmente y cuando se rompe, se puede amasar entre las manos y volver a formarlo varias veces

SUELOS FINOS: Si más del 50 % del material está clasificado como finos

RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA (Consistencia): Tomado de Weltman & Head 1983

TÉRMINO	RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA (kN/m ²)	PRUEBA DE CAMPO
Muy Blando	< 20	Se escurre entre los dedos al apretarse en la mano
Blando	20 – 40	Se puede penetrar fácilmente con el dedo pulgar y moldear mediante ligera presión de los dedos
Medio	40 – 75	El pulgar penetra con esfuerzo y puede ser moldeado con una presión fuerte de los dedos
Alto	75 – 150	El pulgar deja solo una marca y no se puede ser moldeado entre los dedos
Muy Alto	150 – 300	Se puede marcar con la uña del pulgar y el cuchillo penetra cerca de 15 mm
Duro	> 300	No puede ser marcado con la uña del pulgar

SUELOS GRUESOS: Si más del 50% del material está clasificado como grueso

DENSIDAD DE LOS SUELOS: Tomado de BS 5930 1981 – Weltman & Head 1983

TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO
Suelta	Puede ser excavada con pala, introducir fácilmente puntilla de 5 cm y triturrarse entre los dedos
Densa	Se requiere pica para ser excavado. Una puntilla de 50 mm es introducida con dificultad. Se puede triturar entre los dedos con una presión fuerte.
Muy Densa	Con la pica se remueven terrones que pueden ser desintegrados

Anexo A-3.2. Formato para la caracterización del suelos, hoja 2 de 2.

ORIGEN	CARACTERÍSTICAS	NOMBRE DEL ELEMENTO	NOMENCLATURA		
ESTRUCTURAL-FUNDACIONAL	Estas geoformas se originan por la influencia de la actividad tectónica sobre rocas y suelos, generando expresiones en el terreno que se combinan con los procesos denudacionales.	Gancho de falla	Sgf		
		Lomo de presión	Slp (Sle)		
		Cerro estructural	Sce		
		Charco de falla (Sag Pond)	Scf		
VOLCÁNICA-DENUDACIONAL	Son geogormas desarrolladas por estructuras volcánicas y su actividad asociada a materiales arrojados por los mismos, los cuales se encuentran sometidos a procesos denudacionales de clima tropical.	FLUVIO-VOLCÁNICA	Superficie de abanico	Va	
			Escarpe de abanico	Vea	
		SUBHORIZONTALES A INCLINADOS	Lomo residual	Vlr (Dlr)	
			Cimas anchas	Vca (Dca)	
			Colina residual	Vcr (Dcr)	
			Superficie plana o sub-horizontal	Vlpf(Dlp)	
			Ladera suave	Vls (Dls)	
			Ladera moderada	Vlm (Dlm)	
		Ladera inclinada a escarpada	Vle (Del)		
		DENUDACIONAL	Estas geoformas están relacionadas con los procesos denudacionales normales que se presentan en zonas de clima tropical; caracterizadas por erosión, depositación y movimientos en masa.	Microcuencas denudacionales	Dmc
				Depósitos de lavado	Ddl
				Depósitos de ladera o coluviales	Dco
FLUVIAL	Son geoformas derivadas de la actividad agradacional y degradacional de las corrientes fluviales. Incluyen cauces actuales de las corrientes y niveles de terrazas dejadas por sedimentación de cauces, incisión y eventos fluvio – torrenciales.	Cauce o lecho actual del río	Fca		
		Nivel de terraza bajo	Ftb		
		Nivel de terraza medio	Ftm		
		Nivel de terraza alto	Fta		
		Escarpe de terraza	_____Fet_____		
		Cono de deyección	Fcd		
ANTROPOGÉNICO	Corresponden a geoformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros y adecuación de nuevas vías.	Cantera	Ac		
		Llenos mixtos	Allm		
		Llenos de escombros	Alle		
		Botadero de escombros	Abe		
		Terrazas y conos explanados con llenos	Atcer		
		Ladera terraceda	Alt		

Anexo A-4. Ejemplo de nomenclatura para elementos geomorfológicos.

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5	COLOR/CÓDIGO NIVEL 3			
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo	1.1.1.1. Centro histórico					
			1.1.1.2. Zonas de habitación periféricas					
			1.1.1.3. Edificaciones de servicios públicos	1.1.1.3.1. Instituciones educativas		111		
				1.1.1.3.2. Hospitales y clínicas				
				1.1.1.3.3. Mercados				
		1.1.1.3.5. Autoridades ambientales y entidades SINA			112			
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales	1.2.1.1. Zonas industriales	1.2.1.1.1. Zonas comerciales				
				1.2.1.1.2. Zonas comerciales				
		1.2.1. Zonas industriales o comerciales	1.2.1.3. Edificios de seguridad pública	1.2.1.3.1. Bomberos				
				1.2.1.3.2. Cruz Roja				
				1.2.1.3.3. Defensa Civil		121		
				1.2.1.3.4. Ejército				
				1.2.1.3.5. Gfrcel				
				1.2.1.3.6. Policía				
				1.2.1.5. Áreas de producción de energía				
1.2.2.1. Terminales de transporte								
1.2.2.2. Carreteras y autopistas								
1.2.2.3. Estaciones de gasolina								
1.2.4. Aerpuertos								
1.2.5. Obras hidráulicas								
1.3. Zonas de extracción minera y escombreras								
2. TERRITORIOS AGRICOLAS	1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	1.4.1. Zonas verdes urbanas	1.4.1.1. Zonas verdes urbanas		141			
			1.4.1.2. Pequeños parques		142			
			1.4.2. Áreas deportivas		143			
			2.1.5. Tubérculos		215			
			2.2. Cultivos anuales o transitorios		222			
			2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos		226			
			2.2.9. Cultivos confinados		231			
			2.3.1. Pastos limpios		232			
			2.3.2. Pastos arbolados		233			
			2.3.3. Pastos emmalezados o en rastrojados		241			
			2.4.1. Mosaico de cultivos		243			
			2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos					
			2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales					
			3.1.1. Bosque denso					
			3.1.2. Bosque abierto					
3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal	3.2.1.1. Herbazal denso		311			
			3.2.1.2. Herbazal denso		312			
			3.2.1.3. Herbazal denso		313			
			3.2.1.4. Bosque de galería y ripario		314			
			3.2.1.5. Plantación forestal		315			
			3.2.2. Arbustal					
			3.2.3. Vegetación secundaria o en transición					
			3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación					
			4.1. Áreas húmedas continentales					
			5.1.1. Ríos (50 m)					
			5.1.4. Cuerpos de agua artificiales					
			4. ÁREAS HÚMEDAS	4.1.1. Ríos (50 m)	4.1.1.1. Humedal			411
								514

Anexo A-7. Unidades de Cobertura ajustada según metodología Corinne Land Cover, Ideam y IGAC (2003)

ANEXO B

Vulnerabilidad

 <p>SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN 020 DE 2013</p>	 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ</p>	
Guía metodológica de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala detallada			
FORMATO DE CAMPO, DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL E INSPECCIÓN VISUAL - EDIFICACIONES			
N.º Formulario	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Hora y fecha de visita	<input style="width: 100px;" type="text"/>
Sección 1. IDENTIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN			
1.1 Departamento	1.2 Municipio	1.3 Barrio	
1.4 Identificación catastral	<input style="width: 100px;" type="text"/>	<input style="width: 100px;" type="text"/>	<input style="width: 100px;" type="text"/>
	Sector	Manzana	Predio
1.5 Coordenadas	<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>		
	Este	Norte	Cota
1.6 Tipo de identificación	Registro fotográfico - ID foto (N.º)		
<p>Inspección</p> <p>Exterior <input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/></p> <p>Parcial <input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/></p> <p>Completa <input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/></p> <p>N.º Inspección</p> <p>No se permitió <input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/></p> <p>Colapso <input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/></p> <p>Desocupada <input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/></p> <p>Otro <input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/></p>	<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>		
1.7 Identificación predial	Dirección	<input type="checkbox"/> Carrera	<input type="checkbox"/> Calle
		<input type="checkbox"/> Transversal	<input type="checkbox"/> Diagonal
		<input type="checkbox"/> Otro	
1.8 Tenencia del bien	Número (N.º)	<input style="width: 100%; border: none;" type="text"/>	
	Propietario	<input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/>	C.C.
	Arrendatario	<input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/>	C.C.
	Otro	<input style="width: 20px; height: 20px;" type="checkbox"/>	C.C.
Sección 2. CLASIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN			
2.1 Uso predominante	<input style="width: 50px;" type="text"/>		
Indispensables: G IV	Ocupación Especial: G II	Ocupación normal: G I	
1. Salud pública	6. Institucionales	12. Residencial	
2. Salud privada	7. Gubernamentales	13. Comercio	
Atención comunidad. G III	8. Comerciales	14. Multipropósito	<input style="width: 30px;" type="text"/>
3. Seguridad	9. Industria	15. Otro	<input style="width: 30px;" type="text"/>
4. Emergencia	10. Oficinas		<input style="width: 30px;" type="text"/>
5. Educación	11. Parqueaderos		<input style="width: 30px;" type="text"/>

(Continuación)

Formato B-1. Diagnóstico estructural e inspección visual: edificaciones.

(Sigue)

2.2 Ubicación en la manzana			
Esquinera	<input type="checkbox"/>	Medianera	<input type="checkbox"/>
Aislada	<input type="checkbox"/>		
2.3 Número de pisos			
Niveles sobre terreno	<input type="checkbox"/>	Sótanos	<input type="checkbox"/>
Total	<input type="checkbox"/>	Altura entrepiso	<input type="checkbox"/>
2.4 Dimensiones aproximadas del lote		2.5 Área total construida (m²)	
Fronte(m)	<input type="checkbox"/>	Profundidad (m)	<input type="checkbox"/>
2.6 Estado de la construcción		2.7 Calidad en la construcción	
Completa	<input type="checkbox"/>	En construcción	<input type="checkbox"/>
Incompleta	<input type="checkbox"/>	No construido	<input type="checkbox"/>
2.8 Servicios Públicos en el predio		2.7 Calidad en la construcción	
Alcantarillado	<input type="checkbox"/>	Acueducto	<input type="checkbox"/>
Aguas servidas	<input type="checkbox"/>	Energía eléctrica	<input type="checkbox"/>
Aguas lluvias	<input type="checkbox"/>	Teléfono	<input type="checkbox"/>
		Gas	<input type="checkbox"/>
2.9 Parámetros Socioeconómicos			
Habitada	<input type="checkbox"/>	Estratificación	<input type="checkbox"/>
No habitada	<input type="checkbox"/>	Valor Catastral del inmueble (\$ millones)	<input type="text"/>
Ocupación máxima (n.º de habitantes)	<input type="text"/>	Valor de bienes -enseres (\$ millones)	<input type="text"/>
		Valor x m ² de edificación (\$ miles)	<input type="text"/>

Sección 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

3.1 Cimentación			
1. Zapatas	<input type="checkbox"/>	2. Vigas corridas	<input type="checkbox"/>
5. Concreto ciclópeo	<input type="checkbox"/>	6. Pilotes	<input type="checkbox"/>
9. No existe	<input type="checkbox"/>	10. Otro	<input type="checkbox"/>
3. Sistema mixto	<input type="checkbox"/>	4. Caissons	<input type="checkbox"/>
7. Placa de cimentación	<input type="checkbox"/>	8. No identificada	<input type="checkbox"/>
3.2 Sistema de entrepiso			
1. Placa maciza de concreto	<input type="checkbox"/>	4. Vigas metálicas	<input type="checkbox"/>
2. Placa aligerada de concreto	<input type="checkbox"/>	5. Cerchas metálicas	<input type="checkbox"/>
3. Lámina colaborante (SteelDeck)	<input type="checkbox"/>	6. Entramado en madera	<input type="checkbox"/>
7. No aplica	<input type="checkbox"/>	8. Otro	<input type="checkbox"/>
3.3 Sistema estructural		3.4 Sistema de cubierta	
1. Pórticos en concreto reforzado	<input type="checkbox"/>	1. Placa en concreto	<input type="checkbox"/>
2. Muros estructurales en concreto reforzado	<input type="checkbox"/>	3. Estructura metálica y teja	<input type="checkbox"/>
3. Sistema combinado en concreto reforzado	<input type="checkbox"/>	4. Estructura de madera y teja	<input type="checkbox"/>
4. Prefabricados en concreto	<input type="checkbox"/>	5. Otro	<input type="checkbox"/>
5. Mampostería confinada	<input type="checkbox"/>	3.5 Fecha de construcción	
6. Mampostería reforzada	<input type="checkbox"/>	Antes de 1960	<input type="checkbox"/>
7. Mampostería no reforzada	<input type="checkbox"/>	De 1961 a 1997	<input type="checkbox"/>
8. Pórticos en acero	<input type="checkbox"/>	Después de 1998	<input type="checkbox"/>
9. Pórtico arriostrado en acero	<input type="checkbox"/>	3.6 Reformas en la estructura	
10. Pórticos y paneles en madera	<input type="checkbox"/>	No realizadas	<input type="checkbox"/>
11. Pórticos y paneles en otros materiales	<input type="checkbox"/>	En altura: número de pisos adicionales	<input type="text"/>
12. Muros en bahareque	<input type="checkbox"/>	En extensión: ancho (paralelo vía)	<input type="text"/>
13. Muros en tapia pisada	<input type="checkbox"/>	Profundidad (perpendicular vía)	<input type="text"/>
14. Muros en adobe	<input type="checkbox"/>	3.7 Irregularidad en planta	
15. Construcción improvisada	<input type="checkbox"/>	Irregularidad alta	<input type="checkbox"/>
16. Mixto	<input type="checkbox"/>	Irregularidad baja o inexistente	<input type="checkbox"/>
17. Otro	<input type="checkbox"/>	3.8 Irregularidad en altura	
		Irregularidad alta	<input type="checkbox"/>
		Irregularidad baja o inexistente	<input type="checkbox"/>
		Irregularidad media	<input type="checkbox"/>
		Irregularidad media	<input type="checkbox"/>

(Continuación)

Formato B-1. Diagnóstico estructural e inspección visual: edificaciones.

(Sigue)

3.9 Tipología estructural de la edificación		Código	Código
1. Con reforzamiento especial: GIII y GIV	<input type="checkbox"/>		5. Estructuras ligeras
2. Reforzadas: GI y GII	<input type="checkbox"/>		6. Construcciones simples
3. Mampostería reforzada	<input type="checkbox"/>		7. Lotes vacíos
4. Con confinamiento deficiente e híbridas	<input type="checkbox"/>		8. Otra <input type="checkbox"/> _____

Sección 4. EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE DAÑOS DE LA EDIFICACIÓN

4.1 Causa de daños presentes		4.2 Consecuencias presentes	
1. Asentamientos	<input type="checkbox"/>	1. No presenta daños	<input type="checkbox"/>
2. Movimientos en masa	<input type="checkbox"/>	2. Humedades	<input type="checkbox"/>
3. Sismos	<input type="checkbox"/>	3. Empozamientos	<input type="checkbox"/>
4. Inundaciones	<input type="checkbox"/>	4. Fisuras	<input type="checkbox"/>
5. Impactos	<input type="checkbox"/>	5. Grietas	<input type="checkbox"/>
6. Deficiencias constructivas	<input type="checkbox"/>	6. Roturas	<input type="checkbox"/>
7. Otra <input type="checkbox"/> _____		7. Otra <input type="checkbox"/> _____	

4.3 Inundaciones previas		
1. Se ha inundado	<input type="checkbox"/>	2. Altura de inundación (m) <input type="text"/>
4. No se ha inundado	<input type="checkbox"/>	3. Fecha/periodicidad (mes) <input type="text"/>
		5. Períodos de lluvias <input type="text"/>

4.4 Evaluación de daños en elementos estructurales					
ELEMENTO	DAÑO				
	Ninguno	Leve	Moderado	Fuerte	Severo
Elementos verticales					
Elementos horizontales					
Elementos no estructurales					

4.5 Sistema de recolección de aguas servidas		4.6 Reparación de daños anteriores	
1. Conexiones aguas servidas mpio.	<input type="checkbox"/>	1. Total	<input type="checkbox"/>
2. Conexiones improvisadas	<input type="checkbox"/>	3. No se han reparado	<input type="checkbox"/>
3. No son recogidas	<input type="checkbox"/>	2. Parcial	<input type="checkbox"/>
		4. No hay daños	<input type="checkbox"/>

Sección 5. CONDICIONES DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA EN EL PREDIO

5.1 Zonas o escenarios de exposición	
Zona 1. Elementos ubicados sobre la zona estable en la parte superior del talud, sin posibilidad de afectación por retrogresión	<input type="checkbox"/>
Zona 2. Elementos ubicados sobre una ladera potencialmente inestable, o potencialmente afectados por efectos de retrogresión	<input type="checkbox"/>
Zona 3. Elementos ubicados en la trayectoria del movimiento en masa o en la zona de depósito del material deslizado	<input type="checkbox"/>
Zona 4. Elementos fuera del alcance del movimiento en masa y su área de depositación	<input type="checkbox"/>

(Continuación)

Formato B-1. Diagnóstico estructural e inspección visual: edificaciones.

 <p>SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO</p>	<p>CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN 020 DE 2012</p>	 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE BOGOTÁ</p>																		
Guía Metodológica de estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa a Escala Detallada																				
FORMATO DE CAMPO, DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL E INSPECCIÓN VISUAL - OBRAS LINEALES																				
N° Formulario	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Hora y Fecha de Visita <input style="width: 50px;" type="text"/>																		
Sección 1. IDENTIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN																				
1.1 Departamento	1.2 Municipio	1.3 Barrio																		
1.4 Identificación Catastral	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Sector</td> <td style="width: 33%;">Manzana</td> <td style="width: 33%;">Predio</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">Construcción</td> </tr> </table>		Sector	Manzana	Predio	Construcción														
Sector	Manzana	Predio																		
Construcción																				
1.5 Coordenadas	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Este</td> <td style="width: 33%;">Norte</td> <td style="width: 33%;">Cota</td> </tr> </table>		Este	Norte	Cota															
Este	Norte	Cota																		
Registro Fotográfico - ID FOTO (N°)																				
1.6 Ubicación	Dirección: <input type="checkbox"/> Carrera <input type="checkbox"/> Calle <input type="checkbox"/> Transversal <input type="checkbox"/> Diagonal <input type="checkbox"/> Otro																			
	Número (N°) <input style="width: 100px;" type="text"/>																			
Sección 2. CLASIFICACIÓN DE LA OBRA LINEAL																				
2.1 Tipo de Obra Lineal	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"><input style="width: 50px;" type="text"/></td> <td style="width: 33%;"><input style="width: 50px;" type="text"/></td> <td style="width: 33%;"><input style="width: 50px;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Red Vial</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Red de Servicio Público</i></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1. Arteria Vial</td> <td>4. Acueducto</td> <td>7. Electricidad</td> </tr> <tr> <td>2. Puente Vehicular</td> <td>5. Alcantarillado</td> <td>8. Comunicación</td> </tr> <tr> <td>3. Puente Peatonal</td> <td>6. Gas</td> <td>9. Otro <input style="width: 50px;" type="text"/></td> </tr> </table>		<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<i>Red Vial</i>	<i>Red de Servicio Público</i>		1. Arteria Vial	4. Acueducto	7. Electricidad	2. Puente Vehicular	5. Alcantarillado	8. Comunicación	3. Puente Peatonal	6. Gas	9. Otro <input style="width: 50px;" type="text"/>			
<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>	<input style="width: 50px;" type="text"/>																		
<i>Red Vial</i>	<i>Red de Servicio Público</i>																			
1. Arteria Vial	4. Acueducto	7. Electricidad																		
2. Puente Vehicular	5. Alcantarillado	8. Comunicación																		
3. Puente Peatonal	6. Gas	9. Otro <input style="width: 50px;" type="text"/>																		
2.1.1 Redes Viales	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Ancho de la Vía (m)</td> <td style="width: 33%;"><input style="width: 50px;" type="text"/></td> <td style="width: 33%;">Nombre de la Vía</td> </tr> <tr> <td>Tipo de Arteria Vial</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Principal (V1-60m)</td> <td><input style="width: 50px;" type="text"/></td> <td>Intermedia (V4-22m/V5-18m/V6-16m)</td> </tr> <tr> <td>Secundaria (V2-40m/V3-25m)</td> <td><input style="width: 50px;" type="text"/></td> <td>Local (V7-13m/V8-10m/V9-8m)</td> </tr> <tr> <td>Puente Vehicular</td> <td><input style="width: 50px;" type="text"/></td> <td>Puente Peatonal</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Otra <input style="width: 50px;" type="text"/></td> </tr> </table>		Ancho de la Vía (m)	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Nombre de la Vía	Tipo de Arteria Vial			Principal (V1-60m)	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Intermedia (V4-22m/V5-18m/V6-16m)	Secundaria (V2-40m/V3-25m)	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Local (V7-13m/V8-10m/V9-8m)	Puente Vehicular	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Puente Peatonal			Otra <input style="width: 50px;" type="text"/>
Ancho de la Vía (m)	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Nombre de la Vía																		
Tipo de Arteria Vial																				
Principal (V1-60m)	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Intermedia (V4-22m/V5-18m/V6-16m)																		
Secundaria (V2-40m/V3-25m)	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Local (V7-13m/V8-10m/V9-8m)																		
Puente Vehicular	<input style="width: 50px;" type="text"/>	Puente Peatonal																		
		Otra <input style="width: 50px;" type="text"/>																		

(Continuación)

Formato B-2. Diagnóstico estructural e inspección visual: obras lineales.

(Sigue)

Tipo de Material de la Estructura del Pavimento	_____	Número de Calzadas	<input type="text"/>
Número de Carriles por Calzada	<input type="text"/>	Ancho del Carril (m)	<input type="text"/>
Ancho de la berma (m)	<input type="text"/>	Ancho de Andenes (m)	<input type="text"/>
Causa de Daños presentes			
Tipo de Deterioro	_____	Largo (m)	<input type="text"/>
Ancho Invasado (m)	<input type="text"/>	Ancho Útil para Tránsito (m)	<input type="text"/>

2.1.2 Redes de Servicio Público			
<u>1. Red de Acueducto</u>		<u>2. Red de Alcantarillado</u>	
Primaria (6" - 12")	<input type="text"/>	Troncal/Secundaria > 18"	<input type="text"/>
Secundaria (2" - 6")	<input type="text"/>	Local < 18"	<input type="text"/>
Local (1/2" - 2")	<input type="text"/>	Diámetro de la Tubería	_____
Diámetro de la Tubería	_____	Material de la Tubería	_____
<u>3. Red Eléctrica</u>		Transporte y Distribución (57,5 - 230 kV)	
Alta Tensión	<input type="text"/>	Producción y Distribución (1 - 57,5 kV)	<input type="text"/>
Media Tensión	<input type="text"/>	Distribución y Consumo (< kV)	<input type="text"/>
Baja Tensión	<input type="text"/>	Material del Poste	_____
Diámetro de Poste	_____	Altura de Poste	_____
Causa de Daños presentes			
Tipo de Deterioro	_____	Largo (m)	<input type="text"/>
Longitud en deterioro (m)	<input type="text"/>	Ancho (m)	<input type="text"/>

FOTOGRAFÍAS - ESQUEMAS DE DETALLE

COMENTARIOS Y OBSERVACIONES

EVALUADOR

1. Nombre y Apellidos _____

2. Fecha y Número de Formato _____

Formato B-2. Diagnóstico estructural e inspección visual: obras lineales.

Anexo B-3

Manual e instructivo de diligenciamiento para formatos de campo, diagnóstico estructural e inspección visual

Contenido

1. Introducción
2. Objetivo
3. Toma de datos
4. Metodología de adquisición y registro de información en campo
5. Descripción del formato de campo, diagnóstico estructural e inspección visual para edificaciones
 - 5.1 Diligenciamiento del formato para edificaciones
6. Descripción del formato de campo, diagnóstico estructural e inspección visual para obras lineales
 - 6.1 Diligenciamiento del formato para obras lineales

1. Introducción

Los fenómenos de remoción en masa o movimientos en masa son uno de los eventos naturales que producen cada vez más desastres en Colombia, ocasionando un sinnúmero de daños a la población y su infraestructura de redes y servicios. La toma de medidas preventivas reduce los efectos negativos y sus consecuentes pérdidas en el contexto urbano.

En Colombia se evidencia con claridad que las pérdidas ocurridas por movimientos en masa son exponencialmente importantes, tanto por la alta vulnerabilidad de la infraestructura urbana y de líneas vitales como por la relación directa de la geografía nacional con la manifestación de dichos fenómenos. A estas características se suman los efectos de un desarrollo no planificado y desordenado de las áreas de expansión, la explotación irracional de los recursos naturales, el deterioro consecuente del ambiente y una pobreza en constante aumento, que actúan como factores que incrementan el riesgo existente.

Con el desarrollo de este aparte se pretende identificar, caracterizar y evaluar las características físicas de los asentamientos o centros urbanos propensos a ser frágiles y deteriorados por procesos de deslizamiento, para ampliar así el conocimiento sobre la vulnerabilidad y el riesgo de las áreas urbanas. De este modo, se evalúa a su vez la vulnerabilidad de una manera cuantitativa con el objetivo de complementar el análisis de la amenaza –ya descrita y evaluada–, para determinar una percepción del riesgo a partir de los daños que pueden sufrir los elementos potencialmente expuestos, con el fin de que sea fácil de entender para la comunidad y útil para los tomadores de decisiones.

El análisis de la vulnerabilidad se fundamenta en el procesamiento de información primaria obtenida en campo mediante el reconocimiento de la zona de estudio, el cual basa su desarrollo metodológico en el diligenciamiento eficaz, claro y pertinente de formatos que condensan la información sobre la zona de estudio.

2. Objetivo

Desarrollar una metodología de adquisición y registro de información de campo para edificaciones y obras lineales expuestas a la ocurrencia de movimientos en masa, con el propósito de analizarlas y evaluarlas para reducir el nivel de pérdidas y daños, e implementar acciones, iniciativas y procedimientos que mejoren la calidad de vida de la población.

3. Toma de datos

Para analizar la vulnerabilidad en materia de exposición se determina el nivel de daño de un elemento expuesto en función de la naturaleza del evento amenazante y de su tipo, representando la interacción del elemento con el fenómeno de remoción en masa en cuanto a su daño potencial se refiere.

Los elementos expuestos a las amenazas se deben identificar y caracterizar en función de su uso (viviendas, equipamientos, vías, obras lineales, de transmisión, etc.) y de su resistencia a los tipos de sollicitación.

El fundamento para identificar estos elementos es el trabajo topográfico, que se determina en la localización del urbanismo en la zona de estudio; esta se efectúa predio a predio y es la base del proceso para caracterizarlos, desarrollando así el inventario de elementos de la zona que hay que considerar. Dicho inventario contiene información clave que permite establecer, mediante la identificación en campo de los daños en los elementos expuestos, zonas de afectación por movimientos, lo cual ayuda a hacer con mayor detalle el inventario de fenómenos de remoción en masa en los sectores urbanizados.

Es esencial el apoyo por parte de los entes públicos de orden territorial (alcaldías, entidades prestadoras de servicios públicos) para desarrollar actividades en estudios de esta magnitud.

Existe información adicional concerniente a este tema, en la que se hace énfasis en el estado de las obras lineales y de infraestructura, en particular de vías y servicios públicos básicos. Es necesario conocer y comprender el estado de las redes junto a las entidades prestadoras de los servicios públicos, así como evaluar su nivel de funcionamiento (tipo de red, longitudes de tramos, conexiones, cotas, diámetros, etc.), ya que la información disponible sobre los aspectos aquí tratados es insuficiente, por lo cual, en su interacción y soporte, se favorecen el avance del estudio y la comprensión del problema actual.

4. Metodología de adquisición y registro de información en campo

La vulnerabilidad de los elementos expuestos depende de factores involucrados tanto en el proceso de construcción como durante su uso y ocupación. Una mayor vulnerabilidad aumenta el riesgo de sufrir daños, e incluso colapsar, ante la ocurrencia de eventos extremos como fenómenos de remoción en masa, inundación o sismos de mediana y gran magnitud. La falta de planificación urbana, los procesos de autoconstrucción, el desconocimiento de las normas de construcción, el elevado crecimiento demográfico y los desarrollos subnormales en áreas propensas a la acción de fenómenos inducidos incrementan los índices de vulnerabilidad de las edificaciones, obras lineales e infraestructura.

VARIABLES implicadas, como el sistema constructivo, el tipo de materiales, año de construcción, topografía, el entorno, los daños presentes, permiten evaluar la vulnerabilidad física de los elementos expuestos. Con base en estos factores se determinará el grado de vulnerabilidad, que se define como la propensión de dichos elementos a sufrir daños en caso de un evento determinado. El proceso para la toma de datos consta de los siguientes pasos:

- Ingresar a la edificación.
- Diligenciar los datos iniciales, como fecha de la evaluación, hora, departamento y municipio, dirección, coordenadas y nombre del propietario; para esto se recurre a información proporcionada por la persona residente o encargada en la edificación.
- Recorrer la edificación y hacer un diagnóstico visual por parte del evaluador.
- Tomar fotografías, como vistas generales, visuales del sistema estructural y patologías estructurales, si las hay.
- Diligenciar la evaluación en el formato, de acuerdo con la metodología y el diagnóstico hecho en campo, así como complementar con datos e información en oficina.

Para la toma de adquisición y registro de información en campo se utilizan los formatos de campo, diagnóstico estructural e inspección visual para edificaciones y obras lineales, los cuales se presentan y explican en los siguientes apartes del presente anexo; estos constan de las secciones mencionadas a continuación:

1. Sección 1. Identificación de la edificación u obra lineal.
2. Sección 2. Clasificación de la edificación u obra lineal.
3. Sección 3. Descripción del sistema estructural de la edificación.
4. Sección 4. Evaluación y diagnóstico de daños de la edificación.
5. Sección 5. Condiciones de los fenómenos de remoción en masa en el predio.
6. Fotografías y esquemas de detalle.
7. Comentarios y observaciones.
8. Evaluador.

5. Descripción del formato de campo, diagnóstico estructural e inspección visual para edificaciones

El formato de campo (anexo B-1) contiene cinco secciones y tres segmentos complementarios que incluyen los siguientes aspectos de evaluación:

1. Sección 1. Identificación de la edificación
2. Sección 2. Clasificación de la edificación
3. Sección 3. Descripción del sistema estructural de la edificación.
4. Sección 4. Evaluación y diagnóstico de daños de la edificación.
5. Sección 5. Condiciones de los fenómenos de remoción en masa en el predio.
6. Fotografías y esquemas de detalle.
7. Comentarios y observaciones.
8. Evaluador.

Cada una de estas secciones tiene como objetivo identificar y caracterizar la estructura que se está evaluando y los niveles de daño que registra a causa de la ocurrencia de eventos por movimientos en masa.

Vale la pena aclarar que para el correcto y completo diligenciamiento del formato de campo es indispensable la inspección en sitio del elemento, y en algunos aspectos tratados se complementará con la consecución de información secundaria preliminarmente investigada o suministrada por entidades involucradas en el proceso de estudio o en su defecto por información de oficina producto de etapas anteriores en el estudio.

En el anexo B-1 se presenta el formato de campo diseñado para las edificaciones como elementos expuestos que hay que evaluar, detallando su diligenciamiento en las secciones desarrolladas más adelante.

5.1 Diligenciamiento del formato-edificaciones

Este formato (anexo B-1) se diligencia como se explica a continuación:

Número de formulario

El número del formulario corresponde a un consecutivo que tendrá la siguiente composición:

XXX-YYY

Donde

XXX: corresponde a caracteres alfanuméricos, de acuerdo con la abreviatura asignada al municipio donde se hace la evaluación.

YYY: corresponde a caracteres numéricos, los cuales son un número consecutivo desde el 000 hasta el 999.

Hora y fecha de la visita

Corresponde a la hora y minutos al inicio de la visita. Se escribirá desde la hora 0:00 hasta la hora 23:59, en tanto que la fecha se anotará por día, mes y año, en números.

Sección 1. Identificación de la edificación

1.1 Departamento

1.2 Municipio

1.3 Barrio

Se diligencia el texto con los nombres específicos del departamento, municipio y barrio, de acuerdo con la división político-administrativa del área de inspección.

1.4 Identificación catastral

Es la identificación específica del predio o edificación recolectada de la base de datos del registro catastral correspondiente a la organización catastral que maneje el municipio, que lo diferencia y marca como único para el posterior procesamiento de datos de todo el muestreo de campo. Si la edificación por su naturaleza no lo posee, se identificará con un número consecutivo que especifique el sector, el número de manzana, el número del predio en la manzana y el número de construcción en el predio, que obedecería a la identificación topográfica de cada edificación, según el plano topográfico del estudio.

1.5 Coordenadas

Corresponden a los datos numéricos de la ubicación geográfico-espacial de cada edificación.

1.6 Tipo de identificación

Se especifica si la evaluación de la edificación se hizo con una inspección exterior, parcial o completa, o en su defecto, por qué razones no se pudo llevar a cabo, estableciendo si no se permitió el acceso, si fue por colapso, por no estar habitada o por otra razón.

Además, se hará el registro fotográfico pertinente, tomando como identificación de la edificación su vista frontal preferiblemente, consignando en la casilla el número consecutivo que arroja la cámara fotográfica.

1.7 Identificación predial

Hay que indicar el número de la carrera, calle, transversal, diagonal u otra especificación en las casillas y el complemento de la dirección en el espacio de número, especificando el número interior de cada predio. En los predios donde exista doble nomenclatura, se consignará la actualizada en caso de presentarse cambios.

Como fuente confiable se verificará la dirección de la edificación, tal como conste en un recibo de servicio público o su registro en la Oficina de Planeación Municipal.

1.8 Tenencia del bien

Se especifica el nombre del propietario del bien con su número de identificación, o en su defecto el nombre del arrendatario u otra especificidad con su número de identificación respectivo. En caso de ser una edificación o institución pública o privada, se debe indicar su nombre y su encargado, con su identificación.

Sección 2. Clasificación de la edificación

2.1 Uso predominante

En el recuadro de uso predominante se deberá marcar el número correspondiente, de acuerdo con la clasificación dada: edificaciones indispensables, de atención a la comunidad, de ocupación especial o de ocupación normal.

En caso de clasificarse como multipropósito, se consignarán los números de los usos correspondientes en las casillas dispuestas, y si se clasifica como otro, se deberá consignar el nombre del uso predominante en frente.

2.2 Ubicación en la manzana

Se marcará con una *X* la ubicación del predio dentro de la manzana, entre las opciones propuestas: esquinera, medianera (ubicación central en el lote entre dos edificaciones) o aislada (no tiene edificaciones en su colindancia).

2.3 Número de pisos

Se escribirá en la casilla correspondiente el número de niveles sobre terreno –sin contar la cubierta o terraza–, el número de sótanos –si existen–, y en la casilla de total se escribirá la suma de los dos anteriores.

En la última casilla se consignará la altura del entrepiso o placa, si es posible evidenciarla o si se tiene información estructural o planos de diseño.

2.4 Dimensiones aproximadas de lote

Corresponde a los datos numéricos medibles en campo de la magnitud en metros del frente de la edificación y de su fondo o profundidad.

2.5 Área total construida (m²)

Corresponde al dato numérico que resulta del producto de las dos dimensiones levantadas anteriormente (frente y fondo de la edificación) y multiplicadas por el total de número de pisos o niveles encontrados en el elemento.

2.6 Estado de la construcción

Muestra el avance constructivo a la fecha o intenciones de ampliaciones, modificaciones estructurales, etc. Se marcará con una *X* el estado en que corresponda: completa, en caso de que la edificación se encuentre construida íntegramente (cimientos, estructura portante, cerramientos, divisiones y cubierta); incompleta, en caso de que no se esté ejecutando la construcción y no se pueda catalogar como completa; en construcción, en caso de que se encuentre en proceso de construcción, y no construido, en caso de que el lote esté vacío.

2.7 Calidad en la construcción

Se refiere al cumplimiento de las especificaciones mínimas de construcción durante el proceso constructivo. Se identifica la técnica de construcción, además del control en el proceso constructivo.

Se marcará con una *X* la casilla que corresponda: autoconstrucción, en caso de que por los procedimientos constructivos, la diversidad de materiales estructurales utilizados o por información del propietario del bien, se encuentre que la edificación la construyó personal

sin capacitación tecnológica o profesional en construcción, arquitectura o ingeniería civil (o mecánica, si es una estructura en acero), desconocedor de las normas de construcción sismorresistentes o del código correspondiente; o con supervisión profesional, en caso de que por las causas antes nombradas se pueda inferir que la construcción la ejecutó personal con capacitación tecnológica o profesional en construcción, arquitectura o ingeniería civil (o mecánica, si es una estructura en acero), conocedor de las normas de construcción sismorresistentes o del código correspondiente.

Además, se identifica la edad en años de la edificación, consecuente con el momento de construcción de la edificación, y se escribirá en la casilla de en frente los años de construida, aproximando el número de años a la unidad.

2.8 Servicios públicos en el predio

Se marca con una X cada una de las casillas correspondientes a los servicios públicos con que están dotados el predio y la edificación.

Esta información se podrá complementar con la disponible en cada una de las entidades de servicios con las que cuente el municipio.

2.9 Parámetros socioeconómicos

Se marca con una X la casilla correspondiente al estado de ocupación de la edificación. Además se especifica si está habitada o no y se consigna el número de habitantes máximo de ésta.

A su vez, se indica en número el nivel de estratificación social correspondiente al predio y como información socioeconómica se consigna el valor catastral del inmueble a través de una fuente oficial municipal, el valor aproximado de muebles y enseres contenidos en la edificación y el valor del m² de edificación, deducido por el cociente entre el valor catastral del inmueble y el dato numérico del área total construida del elemento.

Sección 3. Descripción del sistema estructural de la edificación

3.1 Cimentación

Se marcará con una X el tipo de cimentación de la edificación, ya sean zapatas, vigas corridas (vigas en concreto reforzado para sistemas de muros), sistema mixto, *caissons* o pilares (corresponden a pilotes excavados a mano que funcionan principalmente por punta), concreto ciclópeo (vigas en concreto ciclópeo, sin vigas de concreto reforzado), pilotes o placa de cimentación (cimentación superficial mediante placa maciza o aligerada). En caso de que la cimentación no se pueda apreciar y el propietario no tenga conocimiento de ésta se marcará la casilla no identificada, y de no existir cimentación se marcará la casilla no existe. De presentar otro sistema de cimentación se marcará la casilla otro y se escribirá en frente el tipo de cimentación presente.

3.2 Sistema de entrepiso

Se marcará con una X el sistema estructural del entrepiso o los entrepisos como corresponda, ya sea placa maciza en concreto, placa aligerada en concreto, placa en lámina colaboran-

te (tipo *steel deck*, con viguetas metálicas o en concreto), entrepiso conformado por vigas metálicas, entrepiso conformado por cerchas metálicas y loseta en concreto o madera, con entramados de madera, y si no hay entrepisos en la edificación se marcará en la casilla no aplica. En caso de encontrarse otro sistema estructural se marcará en la casilla otro y se escribirá en frente el sistema estructural que presenta el entrepiso o los entrepisos evaluados.

3.3 Sistema estructural

Se marcará con una X el sistema al que corresponda la estructura. A continuación se explica brevemente la composición de los sistemas estructurales.

1. *Pórticos en concreto reforzado.* Este sistema está compuesto por un pórtico espacial (columna-vigas), resistente a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, en concreto reforzado.
2. *Muros estructurales en concreto reforzado.* Sistema que no dispone de un pórtico esencialmente completo y en el cual todas las solicitaciones son soportadas por muros en concreto reforzado o pórticos en concreto reforzado, con diagonales en el mismo material.
3. *Sistema combinado en concreto reforzado.* Se caracteriza por presentar pórticos (columna-viga) en concreto reforzado esencialmente completos, combinados con muros en concreto reforzado o pórticos con diagonales en el mismo material.
4. *Prefabricados en concreto.* Sistema compuesto principalmente por elementos prefabricados de concreto, los cuales conforman una estructura resistente a las solicitaciones impuestas y a las particiones de la edificación. Estos prefabricados están conectados por medio de perfiles metálicos, anclajes mecánicos o químicos.
5. *Mampostería confinada.* Sistema de muros de unidades de mampostería de perforación vertical, perforación horizontal o maciza, ya sean de arcilla, concreto o sílico-calcáreos, unidas por mortero; se construye utilizando muros de mampostería rodeados de elementos de concreto reforzado vaciados después de la ejecución del muro y que actúan monolíticamente con éste.
6. *Mampostería reforzada.* Sistema de muros de unidades de perforación vertical, ya sean de arcilla, concreto o sílico-calcáreos, unidas por medio de mortero; está reforzada internamente por barras y alambres de acero, y algunas o todas las celdas se inyectan con mortero de relleno.
7. *Mampostería no reforzada.* Sistema de muros portantes de unidades de mampostería de arcilla, concreto o sílico-calcáreos, unidas por medio de mortero, que no presenta reforzamiento con elementos de concreto reforzado o con refuerzo interno de barras o alambres de acero.
8. *Pórtico resistente a momento en acero.* Sistema compuesto por un pórtico espacial (columna-vigas), resistente a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, con conexiones rígidas, en acero estructural.
9. *Pórtico arriostrado en acero.* Sistema conformado por un pórtico espacial (columna-vigas), no resistente a momentos, esencialmente completo, con diagonales en algunos vanos que van desde la cimentación, con conexiones flexibles, en acero estructural.

10. *Pórtico y paneles de madera.* Sistema compuesto por un pórtico espacial (columna-vigas) y paneles entre los vanos del pórtico fabricados con madera.
11. *Pórtico en madera y paneles en otros materiales.* Sistema conformado por un pórtico espacial (columna-vigas) esencialmente de madera y paneles entre los vanos del pórtico fabricados en otros materiales, como esterilla de guadua.
12. *Muros en bahareque.* Sistema compuesto por paralelos o columnas en guadua o madera, entre los cuales hay un espacio ocupado por un entramado de guadua y barro seco, que puede estar pañetado con mortero o no; éstos conforman los muros estructurales.
13. *Muros en tapia pisada.* Sistema conformado por muros portantes hechos con tierra adicionada con otros materiales, como paja, material celuloso, melado de caña, cañas de guadua, compactado por acción mecánica.
14. *Muros en adobe.* Sistema de muros portantes de unidades de adobe (tierra adicionada con paja u otros materiales), unidas por medio de mortero, que no presenta reforzamiento con elementos de concreto reforzado o con refuerzo interno de barras o alambres de acero.
15. *Construcción improvisada.* Sistema que presenta la utilización de varios tipos de materiales, sin llegar a constituir una estructura organizada ni estructuralmente portante; como su nombre lo indica, está conformada improvisadamente, sin ninguna técnica constructiva coherente.
16. *Mixto.* Cuando en una edificación se presenten dos o más sistemas estructurales y no se determine uno como predominante, se debe marcar esta casilla y anotar al frente el número del ítem de los sistemas estructurales presentes.
17. *Otro.* Cuando en una edificación el sistema estructural no se clasifique dentro de los descritos con anterioridad, se debe marcar esta casilla y escribir en frente la descripción del sistema estructural.

3.4 Sistema de cubierta

Se marcará con una X el sistema estructural de la cubierta, ya sea placa en concreto (maciza o aligerada), placa en *steel deck*, estructura metálica y teja liviana, o estructura de madera y teja. En caso de presentar otro sistema estructural, se marcará en la casilla otro y se escribirá en frente el sistema estructural que presenta la cubierta evaluada.

3.5 Fecha de construcción

Aunque es difícil determinar el año de construcción de una edificación sin tener la información precisa, se debe investigar con los habitantes o vecinos la fecha aproximada de construcción del elemento evaluado, con el objetivo de analizar su comportamiento de acuerdo con la fecha en que se construyeron.

De esta manera, se agruparon así: construidas antes de 1960, entre 1961 y 1997 –período en que se empezó a aplicar la versión preliminar del Código Colombiano de Normas Sismorresistentes de 1984–, la Ley 400 de 1997 y después de 1998, cuando aparece la Norma Sismorresistente de ese año. En estas clasificaciones se indican los cambios y actualizaciones en la normativa para la construcción en Colombia, y a pesar de que en la mayoría de los casos esta información no será decisiva, ya que en gran porcentaje las edificaciones en Colombia se han erigido de manera artesanal y por autoconstrucción, sin tener lineamientos

técnicos de diseños estructurales, al observar en general toda la inspección hecha se puede evaluar su comportamiento.

3.6 Reformas en la estructura

Se marcará con una *X* si en la edificación no se evidencian reformas al sistema original de la construcción.

En caso de no ser así, se consignarán el número de pisos adicionales objeto de la reforma, la dimensión en metros del ancho ampliado y la profundidad del área que se modificó. De este modo, se determinarán la existencia de fallas en el sistema estructural por el empare de elementos, diferencias en edades constructivas sin juntas adecuadas y combinación de procesos y sistemas mal aplicados.

3.7 Irregularidad en planta

Describe el grado de regularidad en planta del sistema estructural.

1. *Irregularidad alta*. Se presenta cuando hay desplazamiento de los planos de acción (figura 1).

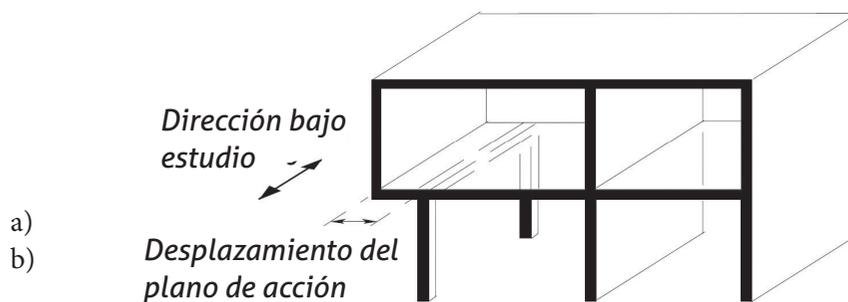


Figura 1. Irregularidad en planta por desplazamiento de los planos de acción.

2. *Irregularidad media*. Se presenta cuando hay:

- a) Retrocesos en las esquinas (figura 2)
- b) Irregularidad del diafragma (figura 3)
- c) Sistemas no paralelos (figura 4)

$$A > 0.15B \quad \text{y} \quad C > 0.15D$$

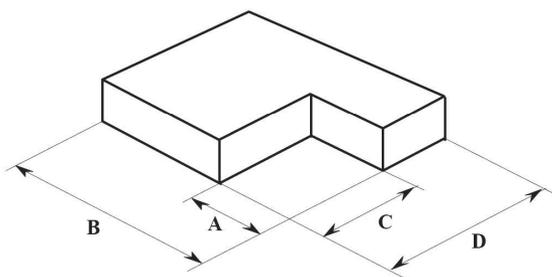


Figura 2. Irregularidad en planta por retrocesos en las esquinas.

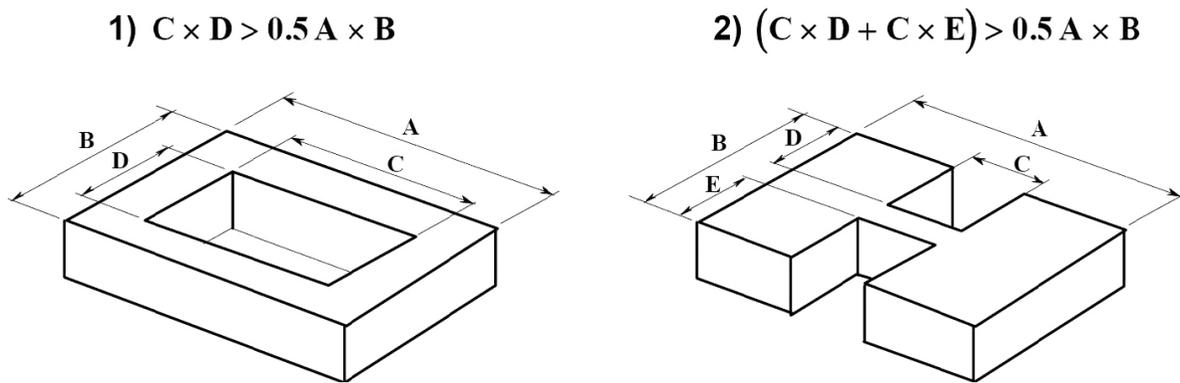


Figura 3. Irregularidad en planta por irregularidad del diafragma.

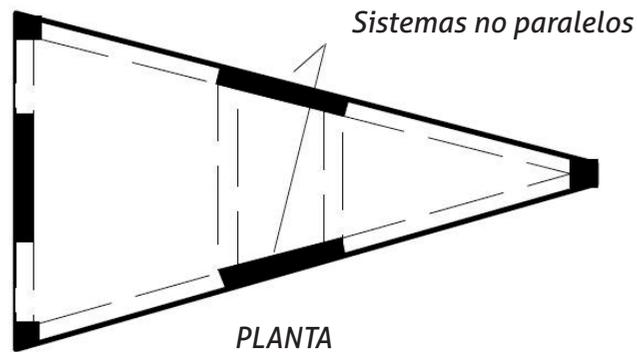


Figura 4. Irregularidad en planta por sistemas no paralelos.

3. *Irregularidad baja o inexistente.* Se presenta cuando no se clasifique dentro de los límites descritos para irregularidad alta o media, o cuando no exista irregularidad.

3.8 Irregularidad en altura

Describe el grado de irregularidad en altura del sistema estructural.

1. *Irregularidad alta.* Se presenta cuando hay:
- a) un piso flexible bajo pisos de mayor rigidez (figura 5).
 - b) desplazamiento dentro del plano de acción (figura 6).
 - c) un piso débil bajo otros más fuertes (figura 7).

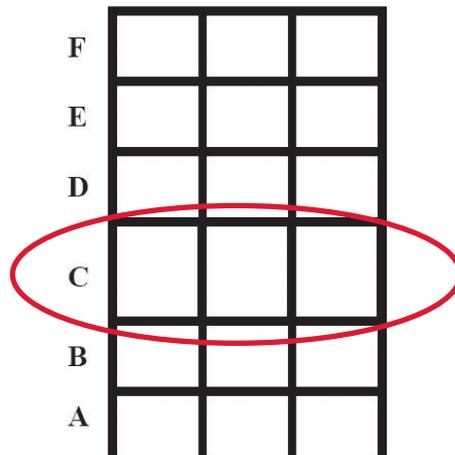


Figura 5. Irregularidad en altura por piso flexible.

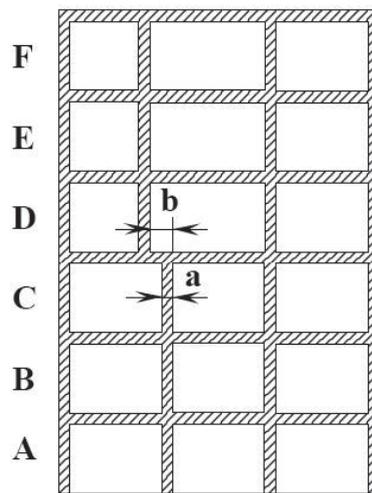


Figura 6. Irregularidad en altura por desplazamiento dentro del plano de acción.

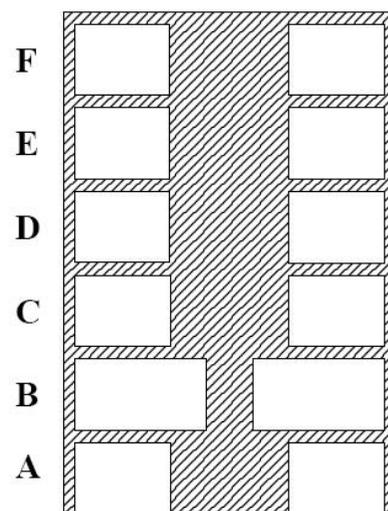


Figura 7. Irregularidad en altura por piso débil.

2. *Irregularidad media*. Se presenta cuando hay:
- Distribución de masa no uniforme, cuando la masa de un piso intermedio excede en más de un 50 % la masa de los pisos adyacentes (figura 8).
 - Irregularidad geométrica (figura 9).

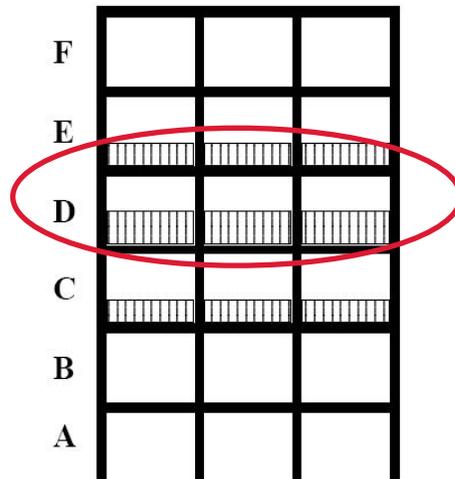


Figura 8. Irregularidad en altura por distribución de masa no uniforme.

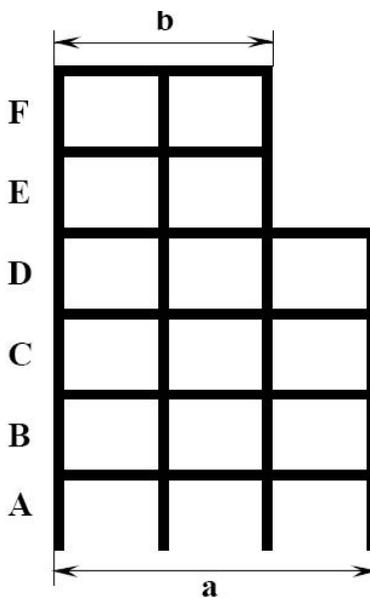


Figura 9. Irregularidad en altura por irregularidad geométrica.

3. *Irregularidad baja o inexistente*. Se presenta cuando no se clasifique dentro de los límites descritos para irregularidad alta o media, o cuando no exista irregularidad.

3.9 Tipología estructural de la edificación

Después de la evaluación y análisis del sistema integral de la edificación, se hace la clasificación de su tipología estructural, y se nombran y particularizan con un código de relación acorde con la clase escogida (tabla 1).

Tabla 1. Tipología estructural de la edificación

CÓDIGO	TIPO DE EDIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
A	Edificaciones con reforzamiento especial	Edificaciones en concreto y acero, diseñadas y construidas con requerimientos superiores a los convencionales o con la exigencia máxima de los códigos de diseño. Se incluyen las edificaciones de los grupos de importancia III y IV, definidos en el Reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR-10, que se construyeron luego de 1998, con pórticos en concreto reforzado, sistema combinado en concreto reforzado, pórticos resistentes a momentos en acero, pórticos arriostrados en acero, etc.
B	Edificaciones reforzadas	Edificaciones con estructura en concreto y acero de los grupos de importancia I y II, construidas con pórticos en concreto reforzado, sistema combinado en concreto reforzado, pórticos resistentes a momentos en acero, pórticos arriostrados en acero, etc. También se incluyen las del grupo A que se construyeron antes de 1998.
C	Mampostería reforzada	Aquellas edificaciones que tienen un sistema estructural de mampostería con elementos de refuerzo (barras, láminas, pernos, platinas, etc.). También se incluyen las edificaciones en mampostería confinada.
D	Estructuras con confinamiento deficiente y estructuras híbridas	Edificaciones con muros cargueros, pero sin confinamiento adecuado (mampostería no reforzada). También hace referencia a aquellas construcciones de las categorías A a C que poseen elementos de otros materiales no competentes, por ejemplo, mampostería no reforzada, adobe, bahareque, madera, tapia pisada, etc., con mayor componente de elementos de los grupos A a C.
E	Estructuras ligeras	Edificaciones construidas con materiales tradicionales o de baja calidad, con un sistema estructural de muros cargueros. Dentro de esta tipología se incluyen las edificaciones construidas en materiales como adobe, bahareque, madera bruta, tapia pisada y las edificaciones prefabricadas.
F	Construcciones simples	Edificaciones que no poseen una estructura definida, de carácter improvisado, generalmente construidas utilizando materiales precarios o de recuperación. Entre éstas se incluyen las edificaciones en proceso de construcción, así como las edificaciones construidas en materiales de recuperación, pórticos y paneles de madera y pórticos en madera y paneles en otros materiales. Tugurios, ranchos, campamentos, carpas, etc., son ejemplo de este tipo de edificaciones.
G	Lotes vacíos	

Sección 4. Evaluación y diagnóstico de daños de la edificación

4.1 Causa de daños presentes

Con esta evaluación se hallará la causa de los daños que se encuentren en la edificación, los cuales se clasifican como daños por asentamientos, movimientos en masa, sismos, inundaciones, impactos y deficiencias constructivas; si hay otra causa, se debe señalar en la casilla respectiva y consignar cuál es la causa evidenciada.

4.2 Consecuencias presentes

Se marcará con una X en la casilla respectiva, de acuerdo con la inspección y evidencia de los daños presentes en la edificación, especificando con respecto a la clasificación presentada si se observan humedades por filtraciones o fugas; empozamientos por acumulaciones, deterioros o inadecuadas impermeabilizaciones; fisuras y grietas por fallas constructivas, pandeos o cargas desmedidas; roturas o extensos agrietamientos a causa de esfuerzos excesivos, u otro daño, y deberá consignar su nombre al frente de esta casilla. De no presentar daños evidentes en la edificación, se marcará en la casilla respectiva a esta situación favorable del elemento.

4.3 Inundaciones previas

Hace referencia a la periodicidad y a la ocurrencia o no de inundaciones en la edificación evaluada. Es un indicador para la obtención de la amenaza por inundación y además, si es posible de determinar, se consignará la altura de la inundación, solo si esta se ha presentado en niveles considerables.

4.4 Evaluación de daños en elementos estructurales

Por medio de la inspección visual se califica el nivel de daño estructural en cada uno de los componentes de la edificación en la siguiente forma (tabla 2).

Para la evaluación del estado de conservación de la estructura se hace una inspección visual a la edificación, en la que se califican tres elementos constituyentes de la estructura: los elementos verticales (columnas o muros cargueros), los elementos horizontales (placas o cubiertas) y los elementos no estructurales (muros divisorios o muros de fachada que no sean cargueros).

1. *Elementos verticales.* Se asocian los efectos de rotación, pandeo, deslizamiento de las juntas horizontales, mecanismo de tensión diagonal, grietas por flexión y aplastamiento.

Tabla 2. Calificación del nivel de daño estructural en los elementos verticales

DAÑOS	NIVEL
No presenta daños.	NINGUNO
Fisuras apreciables (+ 1 mm).	LEVE
Grietas continuas diagonales con aberturas hasta de 3 mm.	MODERADO
Fisuras en juntas horizontales en los extremos superior e inferior del elemento vertical.	
Grietas abiertas continuas (de 3 a 7 mm) y mecanismo de rotura escalonado.	FUERTE
Pérdida de recubrimiento de refuerzo.	
Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera de él (pandeo). Corrosión del acero de refuerzo.	
Grietas (> 7 mm) y desplazamientos que presenten mecanismos de colapso.	SEVERO
Inclinaciones del elemento fuera de su plano vertical.	
Unidades de mampostería con fallas por aplastamiento. Concreto con fallas por aplastamiento. Corrosión muy avanzada en el acero de refuerzo. Pérdidas de sección efectivas superiores al 20 %.	

2. *Elementos horizontales.* Se asocian los efectos de rotación, pandeo, deflexión, grietas por flexión y cortante (tabla 3).

Tabla 3. Calificación del nivel de daño estructural en los elementos horizontales

DAÑOS	NIVEL
No presenta daños.	NINGUNO
Fisuras apreciables (+ 1 mm).	LEVE
Grietas diagonales de cortante con aberturas hasta de 3 mm. Fisuras continuas.	MODERADO
Grietas abiertas (de 3 a 7 mm). Pérdida de recubrimiento de refuerzo. Pandeo apreciable o deflexión del elemento. Corrosión del acero de refuerzo. Fisuras en los apoyos.	FUERTE
Grietas (> 9 mm) y desplazamientos que presenten mecanismos de colapso. Pandeo o deflexión muy apreciable. Pérdida de recubrimiento de refuerzo. Rotura de las varillas de refuerzo. Corrosión muy avanzada en el acero de refuerzo. Pérdidas de sección efectivas superiores al 20 %. Rotura en el punto de apoyo de los elementos horizontales.	SEVERO

3. *Elementos no estructurales.* Se asocian los efectos de rotación del muro, deslizamiento de las juntas horizontales, mecanismo de tensión diagonal y grietas por flexión (tabla 4).

Tabla 4. Calificación del nivel de daño estructural en los elementos no estructurales

DAÑOS	NIVEL
No presenta daños.	NINGUNO
Fisuras apreciables (+ 1 mm).	LEVE
Grietas continuas diagonales con aberturas hasta de 5 mm.	MODERADO
Fisuras en juntas horizontales en los extremos superior e inferior del muro.	
Grietas abiertas continuas (de 5 a 9 mm) y mecanismo de rotura escalonado.	FUERTE
Unidades de mampostería rotas.	
Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera de él.	
Grietas (> 9 mm) y desplazamientos que presenten mecanismos de colapso.	SEVERO
Inclinaciones del muro fuera de su plano vertical.	
Unidades de mampostería rotas.	

4.5 Sistema de recolección de aguas servidas

Se evalúa el sistema de recolección de aguas lluvias. Es fundamental conocer y diagnosticar el manejo que cada predio le hace a este servicio, ya que la presencia de fugas o los manejos inadecuados activa los problemas relacionados con los movimientos en masa. Este diagnóstico incluye la inspección del estado y funcionamiento de las redes y sus respectivas conexiones a la red principal del municipio, además de evaluar si son improvisadas o, en su nivel más crítico, si no son recogidas y enviadas directamente al terreno.

4.6 Reparación de daños anteriores

El diagnóstico de daños y su respectiva falta de reparación determinan si la edificación se encontraba en malas condiciones previamente, lo que evidencia deficiencias en su configuración estructural, o en caso contrario, sus reparaciones le han proporcionado una mejor condición al elemento evaluado. Se consigna la información del estado de la construcción entre las clasificaciones de reparación total o parcial, o si no se han ejecutado obras de reparación, o si hasta el momento de la inspección no se ha detectado ningún tipo de daño.

Sección 5. Condiciones de los fenómenos de remoción en masa en el predio

La evaluación de la vulnerabilidad se hace de manera consecuente para cada uno de los elementos expuestos identificados y caracterizados dentro del área de influencia del fenómeno de remoción en masa que amenaza, de modo que su resultado se pueda espacializar o representar cartográficamente en un mapa.

En este análisis de tipo cualitativo o cuantitativo, se deberá:

- a) Abordar en primer lugar una evaluación del grado de exposición de los elementos del centro urbano y de su entorno (estructuras e infraestructura existente) a los procesos identificados (actuales y potenciales) dentro del área de interés y en sus sectores.
- b) Analizar, en segunda instancia, los aspectos de capacidad de respuesta de los elementos expuestos a partir de las características estructurales específicas que poseen las construcciones existentes frente a las solicitaciones que impondrían los procesos de inestabilidad identificados.

5.1 Zonas o escenarios de exposición

Se determinan la cercanía y ubicación espacial del elemento expuesto con respecto al comportamiento de algún tipo de movimiento en masa, que afecte la condición de la edificación o que debido a su proximidad pueda ver comprometida su estabilidad y estructura. Se marca con una X la casilla correspondiente a la situación presente y evaluada, determinando si el elemento expuesto se encuentra en la zona estable, o potencialmente inestable, o en la trayectoria del movimiento o en su defecto fuera del alcance del movimiento inventariado. Cabe aclarar que esta actividad debe llevarse a cabo con información ya procesada y analizada en etapas preliminares del estudio, y su determinación obedece a datos extraídos de la información de oficina y corroborada en campo.

Sección 6. Fotografías y esquemas de detalle

Registro fotográfico (listado de fotos)

Se registrará en forma consecutiva el número de la foto que asigne la cámara fotográfica usada por el evaluador y se escribirán las descripciones de la fotografía que haya que indicar en cada una.

Esquemas de detalle

El evaluador hará esquemas de disposición de daños en las estructuras, o en cualquier esquema o representación que crea oportuno para la consideración dentro del análisis de vulnerabilidad de las edificaciones.

Sección 7. Comentarios y observaciones

Este espacio se destina para que el observador consigne sus observaciones y comentarios sobre la inspección hecha, en cuanto al estado y vulnerabilidad de la edificación.

Sección 8. Evaluador

Nombre y apellidos

En este espacio se escribirá(n) el (los) nombre(s) y apellidos del evaluador.

Fecha y número de formato de campo

Corresponde a la fecha de realización de la evaluación y a un consecutivo de los formatos de campo realizados por el evaluador, que coincida con el número de formulario asignado al principio de la actividad.

6. Descripción del formato de campo, diagnóstico estructural e inspección visual para obras lineales

Las líneas vitales se refieren al complejo grupo de componentes y sistemas que son esenciales para sostener la vida y el crecimiento de una comunidad. Para asegurar la calidad de vida y habitabilidad de un sector de la población hay que proveerlo de infraestructura de servicios, tales como energía, redes de acueducto y alcantarillado, al igual que de redes de acceso a los lugares, como vías y puentes. Las líneas vitales agrupan los componentes y sistemas físicos de los servicios públicos que son más importantes para la comunidad, por su alto potencial de riesgo en caso de falla.

El formato de campo (anexo B-2) contiene dos secciones y tres segmentos complementarios, que incluyen los siguientes aspectos de evaluación:

1. Sección 1. Identificación de la obra lineal.
2. Sección 2. Clasificación de la obra lineal.
3. Fotografías y esquemas de detalle.
4. Comentarios y observaciones.
5. Evaluador.

Cada una de estas secciones tiene como objetivo identificar y caracterizar la estructura que se está evaluando, así como los niveles de daño que registran a causa de la ocurrencia de eventos por movimientos en masa.

Vale la pena aclarar que para el correcto y completo diligenciamiento del formato de campo resultan indispensables la inspección en sitio del elemento y el acompañamiento y responsabilidad técnica de los aspectos aquí tratados por parte de las entidades municipales involucradas, en lo concerniente a obras lineales y redes de servicios públicos. Su inspección se hará con la ayuda de información secundaria investigada preliminarmente o suministrada por dichas entidades, y el proceso de estudio detallado, si así lo requiere, será responsabilidad de los entes respectivos a escala municipal.

En el anexo B-2 (obras lineales) se presenta el formato de campo creado para las obras lineales como elementos expuestos que hay que evaluar, en tanto que su diligenciamiento se detallará en las secciones desarrolladas más adelante.

6.1 Diligenciamiento del formato-obras lineales

Este formato (anexo B-2) se diligencia como se explica a continuación:

Número de formulario

El número del formulario corresponde a un consecutivo que tendrá la siguiente composición:

XXX-YYY

Donde

XXX: corresponde a caracteres alfanuméricos, de acuerdo con la abreviatura asignada al municipio donde se hace la evaluación.

YYY: corresponde a caracteres numéricos, los cuales son un número consecutivo desde el 000 hasta el 999.

Hora y fecha de la visita

Corresponde a la hora y minutos al inicio de la visita. Se escribirá desde la hora 0:00 hasta la hora 23:59, en tanto que la fecha se anotará por día, mes y año, en números.

Sección 1. Identificación de la obra lineal

1.1 Departamento

1.2 Municipio

1.3 Barrio

Se diligencia el texto con los nombres específicos del departamento, municipio y barrio, de acuerdo con la división político-administrativa del área de inspección.

1.4 Coordenadas

Corresponden a los datos numéricos de la ubicación geográfico-espacial de cada obra lineal que se considera objeto de evaluación.

1.5 Ubicación

Hay que indicar el número de la carrera, calle, transversal o diagonal, u otra especificación en las casillas, y el complemento de la dirección en el espacio del número, especificando el número interior de cada predio o predios que involucra la red vial o de servicio. En los predios donde exista doble nomenclatura, se consignará la actualizada en caso de presentarse cambios.

Como fuente confiable se verificará la dirección de la obra lineal, tal como conste en un inventario de servicios públicos o en su registro en la Oficina de Planeación Municipal.

Sección 2. Clasificación de la obra lineal

2.1 Tipo de obra lineal

En el recuadro de tipo de obra lineal se marcará el número correspondiente, de acuerdo con la clasificación dada: red vial, que comprende vías, puentes vehiculares y puentes peatonales, o red de servicio público, que abarca redes de acueducto, alcantarillado, gas, electricidad o de comunicación. En caso de clasificarse como otro, se deberá consignar el nombre de la obra lineal inspeccionada.

2.1.1 Redes viales

Se consignará inicialmente en el recuadro la dimensión en metros del ancho de la vía y su nombre específico, si así se conoce.

Tipo de arteria vial

Una vez levantada en campo dicha dimensión, se marcará con una X la casilla que corresponda a la clasificación dada, de acuerdo con su ancho e importancia; también se clasifican en este aparte los tipos de puentes y se debe especificar en el recuadro su ancho en cada caso. De presentarse la existencia de otro tipo y clase de red vial, se marcará la casilla de otra, se especificará cuál y se anotará su dimensión en ancho.

De igual manera, se inspeccionará el tipo de material de la estructura del pavimento, así como su naturaleza, y se consignará su nombre en el espacio generado al frente; en las casillas siguientes se anotarán características particulares de las arterias viales, tales como el número de calzadas, el número de los carriles de circulación por calzada, el ancho en metros de dicho carril, el ancho en metros de la berma –si existe– e igualmente el ancho en metros de los andenes –si se evidencian en el trazado y corte de la vía.

Causas de daños presentes

En este segmento se consignará la información sobre los daños evidenciados en la inspección a la red vial, teniendo en cuenta qué tipo de patología o deterioro se presenta, su área de incidencia (dimensión de largo y ancho en metros), el ancho invadido por el agente de deterioro sobre la vía y el ancho que resulta útil para el tránsito y su funcionamiento, a pesar de tener obstruida parte de su dimensión total.

2.1.2 Redes de servicio público

Para el diligenciamiento correcto y oficial de este segmento, se necesita el acompañamiento técnico de información por parte de las entidades prestadoras de servicios públicos en el municipio, las cuales dentro de su inventario de obras contarán con las especificaciones que se requieren en algunos ítems.

1. Red de acueducto

Se marca con una X la existencia de una red de acueducto, su clasificación de acuerdo con el nivel de distribución y el diámetro de la tubería inspeccionada.

2. Red de alcantarillado

Se marca con una X la existencia de una red de alcantarillado, su clasificación de acuerdo con el nivel de captación de aguas servidas, el diámetro de la tubería inspeccionada y el material en que está construida la red.

3. Red eléctrica

Se marca con una X la existencia de una red de electricidad, su clasificación de acuerdo con el nivel de transmisión (nivel de tensión eléctrica) y funcionalidad (capacidad en el tránsito de la tensión) en la red, el diámetro o los diámetros de los postes implicados en la inspección, la altura y el material de dichos elementos.

Causas de daños presentes

En este segmento se consignará la información sobre los daños evidenciados en la inspección a la red de servicio público, teniendo en cuenta qué tipo de patología o deterioro se presenta, su área de incidencia (dimensión de largo y ancho en metros), y la longitud total en metros que se observa y evidencia como expuesta potencialmente a sufrir daños o que ya los presenta.

Sección 3. Fotografías y esquemas de detalle

Registro fotográfico (listado de fotos)

Se registrará en forma consecutiva el número de la foto que asigne la cámara fotográfica usada por el evaluador y se escribirán las descripciones de la fotografía que haya que indicar en cada una.

Esquemas de detalle

El evaluador hará esquemas de disposición de daños en las estructuras, o cualquier esquema o representación que crea oportuno para la consideración dentro del análisis de vulnerabilidad de las obras lineales.

Sección 4. Comentarios y observaciones

Este espacio se destina para que el observador consigne sus observaciones y comentarios sobre la inspección hecha, en cuanto al estado y vulnerabilidad de las obras lineales.

Sección 5. Evaluador

1. Nombre y apellidos

En este espacio se escribirá el (los) nombre(s) y apellidos del evaluador.

2. Fecha y número de formato de campo

Corresponde a la fecha de realización de la evaluación y a un consecutivo de los formatos de campo hechos por el evaluador, que debe coincidir con el número de formulario asignado al principio de la actividad.



En la *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa* se describen los lineamientos metodológicos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local, que se podrán aplicar en la mayoría de las cabeceras municipales y centros poblados pequeños y medianos de Colombia; es decir, aquellos considerados dentro de las categorías 5 y 6, de acuerdo con las leyes 136 de 1994 y 1551 de 2012.

El proceso de la elaboración de esta guía incluyó las siguientes etapas básicas: la primera consistió en revisar juiciosamente referencias recientes y obligadas para establecer el estado del arte en evaluación de riesgos por movimientos en masa, y con base en ello se identificaron los métodos y procedimientos más convenientes para aplicarlos en el medio actual a la escala de detalle que se requiere, considerando la disponibilidad de información y viabilidad técnica y económica.

La segunda etapa correspondió a la discusión amplia y franca de los temas que se desarrollan en la guía, tanto en el grupo de trabajo interinstitucional (SGC y UNAL) como en reuniones y talleres en los que se contó con la participación de asesores externos nacionales e internacionales y con la presencia de representantes de entidades con experiencia investigativa académica y de gestión en materia de riesgos naturales. Como resultado de esta etapa se destaca el desarrollo discutido y consensuado de la guía, esencial para lograr legitimidad y aceptación por parte de quienes deben emplearla.

La tercera etapa del proceso consistió en la armonización de la guía con la normativa vigente, en particular con el proyecto del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio para incorporar la gestión de riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios, el cual finalmente se formalizó mediante el Decreto 1807 del 19 de septiembre de 2014 y con la Resolución 1907 de 2013, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para incorporar la gestión del riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomca).

En esta guía se presentan con detalle los procesos metodológicos que se deben seguir para cumplir con la normatividad en lo relacionado con las etapas de evaluación del riesgo por movimientos en masa, de modo que su ejecución sea viable a partir de la información y las herramientas disponibles y que con ello se consigan condiciones básicas de calidad, rigurosidad y uniformidad en los estudios.

ISBN: 978-958-99528-5-6



9789589952856