

COLECCIÓN GUÍAS Y MANUALES

# GUÍA METODOLÓGICA

PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA  
POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1: 25.000



SERVICIO  
GEOLÓGICO  
COLOMBIANO



GUÍA METODOLÓGICA  
PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA  
POR MOVIMIENTOS EN MASA  
ESCALA 1: 25.000

---

**Dirección de Geoamenazas**  
Grupo de Evaluación de Amenaza  
por Movimientos en Masa



SERVICIO  
GEOLÓGICO  
COLOMBIANO



## SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Oscar Paredes Zapata  
DIRECTOR GENERAL

Martha Lucía Calvache Velasco  
DIRECTORA TÉCNICA DE GEOAMENAZAS

Gloria Lucía Ruiz Peña  
COORDINADORA GRUPO DE EVALUACIÓN  
DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

### GRUPO DE TRABAJO

Gloria Lucía Ruiz Peña  
Edgar Alexander Rodríguez Castiblanco  
Gustavo Adolfo Trejos González  
Enif Medina Bello  
Karol Constanza Ramírez Hernández  
Jesús Hernando Sandoval Ramírez (Q.E.P.D.)  
Jorge Arturo Castro Guerra  
Eduardo Castro Marín  
Jorge Leonardo Chaparro Cordón  
Gabriel Avellaneda Avellaneda  
Rosalbina Pérez Cerón  
Sofía del Rosario Navarro Alarcón  
Antonio Andrés Reyes Merchán  
Diego Gerardo Ibañez Almedia (Julio 2015 – Octubre 2016)  
Mario Andrés Cuellar Cárdenas (Julio 2015 – Octubre 2016)  
Luz Marina Espinosa García (Septiembre 2016 – Diciembre 2016)  
Héctor Cepeda Vanegas (Julio 2015 – Octubre 2015)

### AUTORES

Edgar Alexander Rodríguez Castiblanco  
Jesús Hernando Sandoval Ramírez (Q.E.P.D.)  
Jorge Leonardo Chaparro Cordón  
Gustavo Adolfo Trejos González  
Enif Medina Bello  
Karol Constanza Ramírez Hernández  
Eduardo Castro Marín  
Jorge Arturo Castro Guerra  
Gloria Lucía Ruiz Peña

### APORTES TÉCNICOS

Rosalbina Pérez Cerón  
Diego Gerardo Ibañez Almedia  
Sofía del Rosario Navarro Alarcón  
Mario Andrés Cuellar Cárdenas  
Antonio Andrés Reyes Merchán  
Héctor Cepeda Vanegas

### APROPIACIÓN SOCIAL

Gabriel Avellaneda Avellaneda  
Luz Marina Espinosa García

### LOGÍSTICA TALLERES DE APROPIACIÓN

Grupo de Participación Ciudadana y Comunicaciones

### ASESOR INTERNACIONAL

Dr. Cees van Westen  
Universidad de Twente

### REVISIÓN TÉCNICA EXTERNA

Dr. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda  
Universidad Javeriana y Universidad Nacional de Colombia  
Dr. Modesto Eusebio Portilla Gamboa  
Universidad Nacional de Colombia  
MSc. Marco Fidel Gamboa Ramírez  
Universidad EAFIT y Universidad Nacional de Colombia  
sede Medellín  
MSc. Juan María Montero Olarte  
Asesor - Servicio Geológico Colombiano

© Servicio Geológico Colombiano  
ISBN: 978-958-59782-2-5

### COMITÉ EDITORIAL

Servicio Geológico Colombiano  
Diagonal 53 N.º 34-53  
Bogotá D. C., Colombia  
Teléfono: 220 0200, ext.: 3048  
ceditorial@sgc.gov.co

Guillermo Parrado Lozano  
PRESIDENTE

Margarita Bravo Guerrero  
Marta Calvache Velasco  
Héctor Enciso Prieto  
Fernando Mosos Patiño  
Alberto Ochoa Yarza  
Gloria Prieto Rincón  
Viviana Dionicio  
Teresa Duque  
Julián Escallón  
Armando Espinosa  
Gustavo Garzón  
Juan Manuel Herrera

### CORRECCIÓN DE ESTILO

Carolina Sepúlveda

### DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Diana Paola Abadía

### DIAGRAMACIÓN

Leonardo Cuéllar

### COORDINACIÓN EDITORIAL

Carolina Hernández O.

### FOTO DE CARÁTULA

Panorámica del municipio de Capitanejo,  
departamento de Santander.

© Jorge Leonardo Chaparro Cordón

### IMPRESIÓN

Imprenta Nacional de Colombia  
Carrera 66 N.º 24-09  
PBX: 457 8000  
www.imprenta.gov.co

Bogotá, D. C., Colombia  
Diciembre, 2017

# | Presentación |

La evaluación de amenaza por movimientos en masa como línea de investigación de la dirección de Geoamenazas del Servicio Geológico Colombiano (SGC) constituye uno de los pilares misionales de esta Institución, que como entidad de ciencia y tecnología ha emprendido un liderazgo en la elaboración de guías y manuales para la construcción de conocimiento geocientífico, como patrimonio de la nación y a su vez como herramientas de apoyo a la política nacional de planificación territorial y gestión del riesgo.

La guía que aquí se presenta surge como un aporte al conocimiento integral del territorio para contribuir con la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible; y es producto de la experiencia acumulada por el SGC en más de 30 años en el estudio de las amenazas geológicas. Su elaboración se fundamenta en tres principios clave: gradualidad en el conocimiento, aplicabilidad en el territorio y rigurosidad en los procedimientos de consecución y análisis de datos, promoviendo como base para el estudio de los movimientos en masa en el conocimiento del territorio, con una visión interdisciplinaria y la información disponible que al igual que el SGC, otras entidades aportan continuamente.

Existen diferentes propuestas metodológicas y herramientas para el estudio de amenaza por movimientos en masa, cuyo nivel de complejidad y necesidad de información varía dependiendo de las características geológicas y ambientales del territorio, la escala de trabajo, la disponibilidad de información e incluso las capacidades técnicas y económicas de que se disponga. De igual forma, el Gobierno Nacional ha impulsado la expedición de políticas y estrategias de gestión orientadas a establecer consideraciones técnicas a tener en cuenta para la ejecución de estos estudios tales como la ley 388 de 1997, ley 1523 de 2012, decreto 1640 de 2012, decreto 1807 de 2014 y decreto 1077 de 2015. Bajo este panorama, se vislumbra la necesidad de contar con herramientas técnicas que permitan armonizar el estado del conocimiento en la temática con la normatividad vigente, razón por la cual el SGC se complace en presentar esta publicación, en la que, reconociendo el esfuerzo y aporte que otras instituciones han realizado, se presenta una base conceptual y aplicada que permite definir criterios de calidad, uniformidad y objetividad, tanto para la elaboración como para la supervisión de estudios de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000.

La metodología que se presenta en esta publicación no pretende establecerse como una ruta fija que imposibilita considerar variaciones en su aplicación, por el contrario, en este proceso se reconoce la visión y experiencia profesional de actores locales y regionales, cuyo conocimiento de las particularidades de cada zona de estudio sirve como complemento al enfoque propuesto. Es una herramienta dirigida a un público multiobjetivo, que abarca desde la academia e investigación, hasta planificadores y tomadores de decisiones; su configuración final ha sido el resultado de un proceso de revisión documental, discusión con expertos y acompañamiento y apropiación de destacados actores relacionados con la temática.

Por esta razón, tenemos el orgullo de presentar la Guía metodológica para estudios de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, un aporte del Gobierno Nacional para la planificación segura de nuestras regiones.

**Oscar Paredes Zapata**

Director Servicio Geológico Colombiano



# | Agradecimientos |

Como parte de la elaboración de esta guía, se desarrolló un proceso de apropiación social con el cual se buscó promover la participación, la integración, el acompañamiento y la apropiación del documento por parte de sus posibles usuarios, contando con aportes de la comunidad académica, profesional e institucional con experiencia en el tema de estudio. En este proceso se realizaron cuatro talleres en los que se trataron diferentes temas, desde la pertinencia y necesidad de la guía en el contexto nacional hasta aspectos técnicos, científicos y metodológicos a tener en cuenta para la definición del enfoque final. Agradecemos a cada uno de los participantes en los distintos talleres, dado que sus valiosos aportes permitieron consolidar la propuesta que se presenta en esta publicación. Agradecemos la presencia de docentes, investigadores y estudiantes de las siguientes instituciones: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales – UDCA, Escuela de Ingenieros Militares – ESING, Universidad de Caldas, Universidad Antonio Nariño – UAN, Universidad de los Andes, Universidad de Medellín, Universidad de Pamplona, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Universidad EAFIT, Universidad ECCI, Pontificia Universidad Javeriana, Universidad La Gran Colombia, Universidad Libre, Universidad Militar Nueva Granada, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC, Universidad Santo Tomás, Universidad Francisco de Paula Santander – UFPS, Universidad Central, Universidad Surcolombiana, Universidad de La Sabana y Fundación Universitaria Agraria de Colombia – Uniagraria. También, a quienes desde su experiencia y conocimiento en ordenamiento territorial y gestión del riesgo, en cada una de sus regiones, constituyen uno de los públicos más representativos en el estudio de esta temática: Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER, Corporación Autónoma Regional de Boyacá – CORPOBOYACÁ, Corporación Autónoma Regional de Chivor – CORPOCHIVOR, Corporación Autónoma Regional del Guavio – CORPOGUAVIO, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, Corporación Autónoma Regional de Nariño – CORPONARIÑO, Corporación Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA, Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Macarena – CORMACARENA, Corporación Autónoma Regional de Santander – CAS, Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía – CORPORINOQUIA, Gobernación de Cundinamarca, Alcaldía Municipal de Popayán, Alcaldía Municipal de Pitalito.

Aportes técnicos relevantes en el direccionamiento de la guía fueron obtenidos de instituciones del orden nacional y asociaciones de profesionales como: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, Instituto Nacional de Vías – INVIAS, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Procuraduría General de la Nación, Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, Unidad de Planificación Rural Agropecuaria – UPRA, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD, Unidad Restitución de Tierras – UNRT, Instituto Colombiano Agropecuario – ICA, Departamento Nacional de Planeación – DNP y Fondo de Adaptación, Asociación Colombiana de Ingenieros – ACIEM, Consejo Profesional Nacional de Ingeniería – COPNIA, Sociedad Colombiana de Geotecnia – SCG, Sociedad Colombiana de Arquitectos – SCA y Sociedad Colombiana de Ingenieros – SCI.

Finalmente, resaltamos los aportes de los consultores quienes, desde sus diferentes visiones como posibles usuarios del documento, aportaron reflexiones sobre los desafíos que se enfrentan en el estudio de los movimientos en masa y la necesidad de estandarizar los procesos de análisis que puedan ser replicables en diferentes zonas del país.

Los autores de esta guía expresan un agradecimiento especial por sus importantes opiniones y revisiones a los investigadores:

- » Dr. Cees van Westen, Docente investigador ITC - Universidad de Twente.
- » Dr. Carlos E. Rodríguez Pineda, Docente investigador Pontificia Universidad Javeriana y Universidad Nacional de Colombia.
- » Dr. Modesto Portilla Gamboa, Docente investigador Universidad Nacional de Colombia.
- » MSc. Marco F. Gamboa Ramírez, Docente investigador Universidad EAFIT y Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- » MSc. Juan M. Montero Olarte, Asesor Servicio Geológico Colombiano.

“Con afecto a nuestro compañero y amigo  
Jesús Hernando Sandoval Ramírez (1962-2017)  
por su gran aporte en el desarrollo de este documento,  
con el cual demostró un gran compromiso a nivel técnico  
y como ser humano. Este equipo de trabajo siempre recordará  
sus enseñanzas y su ejemplo como persona y profesional,  
gran maestro, siempre dispuesto a compartir su conocimiento”



# | Tabla contenido |

<b>PRESENTACIÓN</b>	<b>03</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>05</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>15</b>
1.1 MARCO CONCEPTUAL	17
1.1.1 Caracterización geoambiental	18
1.1.2 Análisis de la susceptibilidad	19
1.1.3 Caracterización de la amenaza	20
1.2 DEFINICIONES	21
1.3 ALCANCE	22
1.3.1 Escenarios de amenaza	25
<b>2. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA BÁSICA</b>	<b>27</b>
2.1 ESCALA DE TRABAJO Y ÁREA DE ESTUDIO	30
2.2 ÁREA MÍNIMA CARTOGRAFIABLE	31
2.3 CARTOGRAFÍA BASE	31
2.3.1 Sistema de referencia	32
2.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM)	32
2.4.1 DEM NASA	32
2.4.2 DEM ALOS PALSAR	33
2.4.3 Modelos digitales de elevación a partir de curvas de nivel	33
<b>3. CARACTERIZACIÓN GEOAMBIENTAL</b>	<b>35</b>
3.1 INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS	41
3.1.1 Catálogo e inventario	41
3.1.2 Contenido del inventario (Atributos)	43
3.1.3 Fuentes de información	44
3.1.4 Representación cartográfica	48
3.1.5 Consideraciones finales	55
3.2 FACTORES CONDICIONANTES	57
3.2.1 Geomorfología	57
3.2.2 Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	65
3.2.3 Cobertura de la tierra y uso del suelo	72
3.3 FACTORES DETONANTES	87
3.3.1 Lluvia	88
3.3.2 Sismo	89
<b>4. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD</b>	<b>91</b>
4.1 LA UNIDAD DE ANÁLISIS	95

4.2 ALISTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	95
4.3 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO DESLIZAMIENTO	96
4.3.1 Pesos de Evidencia (Weight of Evidence, WofE)	96
4.3.2 Aplicación de la metodología	99
4.4 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO CAÍDA	104
4.5 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO	106
4.6 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO REPTACIÓN	107
4.7 ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	107
4.7.1 Leyenda del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa	110
4.8 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	110
<b>5. CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA</b>	<b>113</b>
5.1 PROBABILIDAD ESPACIAL	116
5.2 PROBABILIDAD TEMPORAL	116
5.2.1 Detonante lluvia	117
5.2.2 Detonante sismo	120
5.2.3 Probabilidad Empírica – Distribución de Poisson	126
5.3 ANÁLISIS DE MAGNITUD	126
5.4 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA	126
5.4.1 Leyenda del mapa de amenaza	128
<b>6. RECOMENDACIONES FINALES</b>	<b>131</b>
6.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	133
6.2 PERFIL DE LOS PROFESIONALES	135
<b>ANEXOS</b>	<b>137</b>
3.1 INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS	138
3.2.2 Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	150
3.2.3 Coberturas de la tierra y uso del suelo	178
4.1 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	184
6.1 PRESENTACIÓN DE MAPAS FINALES	188

# | Introducción |

Durante las últimas tres décadas, a raíz de la ocurrencia de desastres de origen socio-natural, se han expedido en Colombia reglamentaciones relacionadas con la administración y desarrollo físico del territorio, la utilización del suelo y la gestión del riesgo de desastres, cuya adopción ha requerido de la elaboración de estudios técnicos que permitan tomar decisiones efectivas de planificación y al mismo tiempo incorporar la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios.

Normas de ordenamiento territorial tales como Ley 388 de 1997 y los Decretos 879 de 1998, 3600 de 2007, 1807 de 2014, 1077 de 2015, o de gestión del riesgo de desastres como la Ley 1523 de 2012, entre otras, han sido iniciativas lideradas desde el gobierno nacional, en cuya reglamentación se ha dado relevancia al conocimiento del territorio como una premisa para contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.

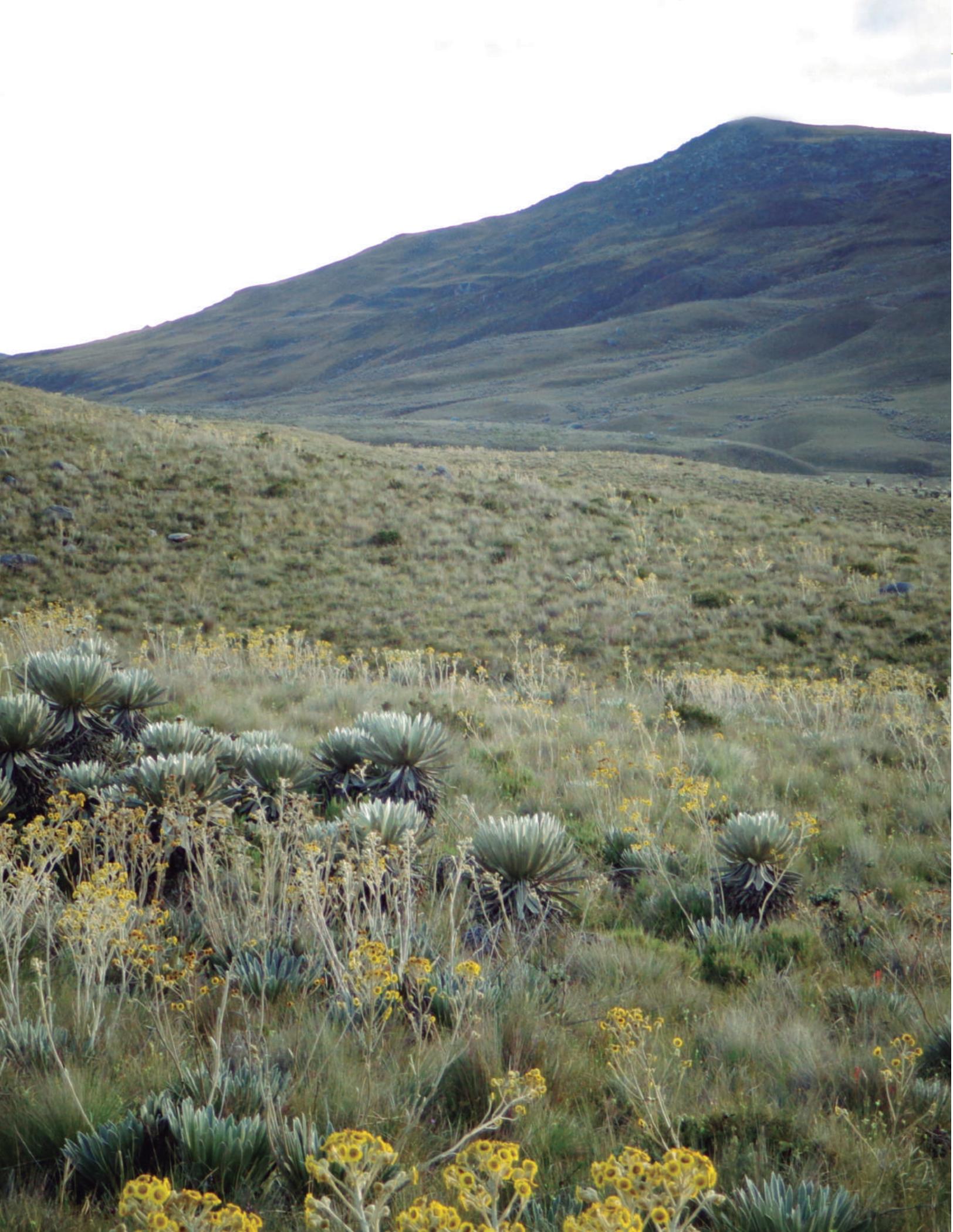
A la par de estas iniciativas, se ha evidenciado la necesidad de generar guías o lineamientos metodológicos que permitan establecer algunas condiciones básicas de calidad, rigurosidad y uniformidad de los estudios técnicos; como apoyo para la adecuada aplicación de la normatividad vigente.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), en cabeza de la Dirección de Geoamenazas y como parte del Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo, ha liderado la evaluación de amenazas por movimientos en masa a partir de la realización de estudios de zonificación a escala nacional, regional y local, junto con la generación de documentos metodológicos guía para técnicos, tomadores de decisiones y demás actores relacionados con la temática tanto a nivel urbano como rural. Como aporte a los procesos de conocimiento del territorio colombiano, se ha elaborado la presente guía para estudios de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, aplicable en el suelo rural (Ley 388 de 1997), como apoyo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios.

Considerando la complejidad implícita en el entendimiento y representación de las condiciones geoambientales y socioculturales que determinan la estabilidad del terreno o la ocurrencia de un movimiento en masa, así como, las particularidades de cada zona de estudio y la importancia del juicio experto multidisciplinar, esta propuesta tiene en cuenta premisas de calidad y gradualidad en el conocimiento, viabilidad técnica y replicabilidad de la metodología, presentando aspectos claves para el análisis y evaluación de amenaza por movimientos en masa mediante la aplicación de métodos con base en Sistemas de Información Geográfica (SIG), a partir del levantamiento y análisis a la escala de trabajo del inventario de procesos morfodinámicos, información geológica, geomorfológica, de cobertura de la tierra y uso del suelo, hidrológica y sísmica.

No obstante lo anterior, este documento no pretende establecerse como una norma que conduce al usuario por una ruta fija e inamovible, sino brindar herramientas para la unificación de conceptos y la elaboración de estudios uniformes con la aplicación de criterios claros y homogéneos.

Los conceptos, métodos y técnicas presentadas en esta guía se basan en trabajos internacionales y nacionales de amplia consulta (AGS, 2007; JTC-1, 2008; UN-ISDR, 2009; Corominas et al., 2013; SAFELAND, 2010-2012; SGC & UNAL, 2015a; DPAE, 2000; INGEOMINAS, 2001; Yamín et al., 2013,



Cardona, 2013; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL, 2013), cuya revisión es abordada más desde el punto de vista técnico-práctico y no científico. Además, durante el proceso de construcción del documento se desarrollaron talleres técnicos en los que se contó con la participación de expertos internacionales y nacionales de diferentes instituciones y entidades públicas y privadas del orden nacional, regional y local; cuya discusión y aportes fueron incorporados y hacen parte fundamental en el enfoque metodológico presentado.

Entre los posibles usuarios de la guía se encuentran todos aquellos profesionales encargados de la elaboración, supervisión y administración de estudios de amenaza por movimientos en masa, planificadores, tomadores de decisiones en el ámbito de la administración pública. También la guía sirve como referencia para investigadores y académicos cuya labor se relacione con la gestión del riesgo por movimientos en masa y planificación del territorio.

La metodología propuesta es resultado de la documentación de diferentes proyectos desarrollados en el SGC, en diferentes ambientes y escalas en el territorio nacional, en los cuales se han validado algunos de los procedimientos propuestos.

El capítulo uno del documento comprende las generalidades y el marco conceptual sobre el que se fundamenta la guía, incluyendo los conceptos, definiciones y el alcance en el marco de la normatividad sobre ordenamiento territorial y gestión del riesgo. El capítulo dos presenta el área de estudio recomendada para la aplicación de la metodología propuesta, así como algunos insumos cartográficos básicos y posibles fuentes de información.

El capítulo tres describe las características geoambientales consideradas más relevantes para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, requisitos a tener en cuenta para su levantamiento, análisis y representación cartográfica. Las temáticas propuestas se dividen en tres títulos principales: inventario de procesos morfodinámicos, factores condicionantes (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo) y factores detonantes (lluvia y sismo), abarcando aspectos y criterios generales que son identificables casi en cualquier zona de estudio. El análisis de estas características conduce a la generación de una hipótesis de falla que relaciona los tipos de movimientos en masa identificados en la zona de estudio y la causa de su ocurrencia.

El capítulo cuatro, por su parte, está dedicado a la zonificación de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de movimientos en masa. En este capítulo se presenta la metodología para la aplicación de un método estadístico bivariado combinado con criterios geomorfológicos y evidencias de campo. Se presentan algunos detalles teóricos, limitaciones y requerimientos para la aplicación de la propuesta, así como, formas de validación de los resultados obtenidos.

El capítulo cinco presenta la propuesta para la caracterización de la amenaza, basada en el análisis de datos que permitan establecer la frecuencia de ocurrencia de los movimientos en masa en términos de probabilidad espacial, temporal y de magnitud.

Finalmente, el capítulo seis contiene algunas recomendaciones sobre la presentación de los resultados y el perfil de los profesionales para la elaboración, supervisión o administración de este tipo de estudios.

Es importante señalar que, aunque se han considerado varios escenarios para el análisis de amenaza, la retroalimentación de la guía a partir de la aplicación en casos piloto constituye una etapa fundamental para la validación de la metodología propuesta. Esta será una labor liderada desde el SGC y acompañada por todos quienes utilicen esta herramienta.



An aerial photograph of a vast mountain range. The foreground shows rolling green hills with some small structures and a road. The middle ground is dominated by a series of sharp, green mountain peaks and ridges. The background consists of more distant, hazy mountain ranges under a bright, cloudy sky. The overall color palette is dominated by greens and blues.

# 1 GENERALIDADES



# | Capítulo 1 |

Existen en la literatura técnica gran variedad de métodos y enfoques metodológicos para el análisis de la amenaza por movimientos en masa a diferentes escalas, que han servido de base para la elaboración de guías e incluso para la generación de normas en diferentes países (AGS, 2007; Fell et al., 2008; Corominas et al., 2013). Las razones fundamentales de estos trabajos radican en la necesidad de unificar la terminología relacionada con el tema, resaltar las temáticas e información fundamentales para el desarrollo de estos análisis y promover la aplicación de técnicas que permitan entender la problemática relacionada con los movimientos en masa y cuyos resultados contribuyan en la toma de decisiones para la adecuada planificación del territorio.

Considerando lo anterior y de acuerdo con la normatividad adoptada en Colombia en temas de gestión del riesgo y planificación territorial, se ha evidenciado la necesidad de plantear análisis de amenaza que permitan obtener resultados lo más objetivos posibles de manera que se puedan reproducir, comparar y apropiar en diferentes zonas de estudio, mejorando así la posibilidad de priorizar las acciones de manejo y disponibilidad de recursos, su incorporación con otras herramientas de planificación y la adopción de políticas de gestión (Corominas et al., 2013).

El análisis de la amenaza por movimientos en masa como primer insumo en el proceso de gestión integral del riesgo se debe enfocar idealmente en la obtención de cálculos probabilísticos que permitan una posterior estimación de las pérdidas potenciales debidas a la materialización del evento. Sin embargo, se debe tener presente que aunque se han hecho esfuerzos tanto desde el quehacer de la academia como de las instituciones de investigación para cuantificar los análisis de amenaza, estos requieren de la disponibilidad

de datos y fuentes de información confiables que garanticen cubrimiento espacial y temporal de las temáticas involucradas, así como, la aplicación de procedimientos de análisis rigurosos, de los cuales se cuenta con ejemplos muy valiosos solo en ciertas zonas del país. La importancia por ejemplo en el levantamiento de la información en campo de temáticas como geología o geomorfología, el monitoreo de mediano y largo plazo de los efectos de la materialización de las amenazas y la capacitación en la toma de datos e inversión en el conocimiento del territorio, ha tomado relevancia solo en años recientes y en ocasiones estos aspectos constituyen limitantes para abordar análisis cuantitativos.

Teniendo en cuenta este panorama y el objetivo final de la guía, a continuación se describe el marco conceptual a partir del cual se desarrolla el presente documento, como una aproximación al análisis cuantitativo de la amenaza por movimientos en masa, en cuya construcción se han incluido aspectos de viabilidad para su aplicación en situaciones en que la falta de datos se presente como una limitante.

## 1.1 MARCO CONCEPTUAL

---

El análisis de la amenaza por movimientos en masa es un proceso que requiere de la interacción e intervención de diferentes disciplinas temáticas relacionadas con las ciencias de la tierra y un suficiente conocimiento de la zona de estudio en que es esencial el juicio experto en cada una de sus etapas. Dado que el objetivo de este documento no es describir en detalle todos los escenarios, aproximaciones y enfoques existentes, en la Figura 1.1 se esquematiza el proceso

metodológico propuesto en esta guía para el análisis de amenaza por movimientos en masa, el cual consta de tres etapas que permiten analizar tanto los movimientos en masa que actualmente ocurren, como los que pueden ocurrir, además de sus características y factores causales.

Las etapas del proceso a través de las cuales se obtiene el producto final de zonificación son:

1. Caracterización geoambiental
2. Análisis de susceptibilidad
3. Caracterización de la amenaza

Dado que el análisis de amenaza debe llevar a la zonificación del territorio, cada etapa de la metodología propuesta implica el manejo de datos espaciales mediante el levantamiento de información en campo y uso de herramientas SIG. A continuación se describen las etapas planteadas.

### 1.1.1 Caracterización Geoambiental

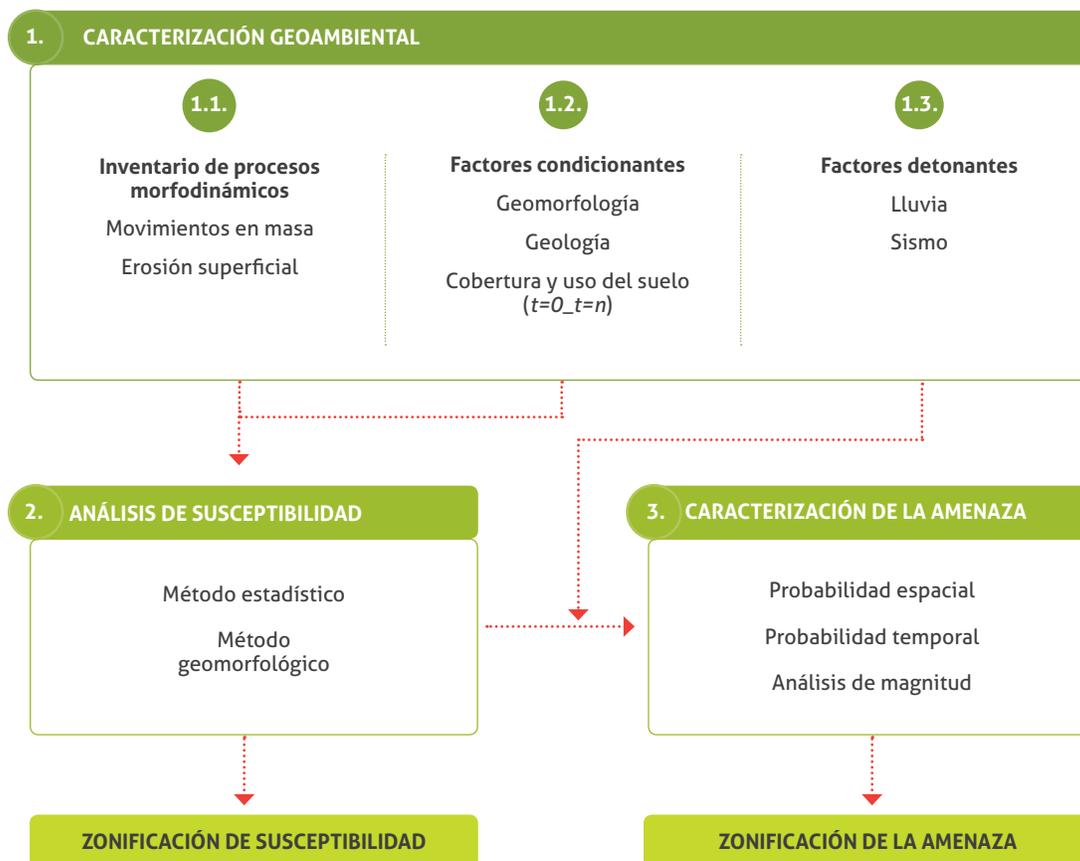
Para el análisis y zonificación de la amenaza es necesario partir del conocimiento de las características geoambientales que determinan o pueden determinar la ocurrencia de un movimiento en masa en una región o área de estudio.

Esta etapa comprende el levantamiento y consecución de la información temática y los datos de entrada requeridos para obtener la zonificación de susceptibilidad y amenaza (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo, clima y sismicidad). En esta etapa se adelantan las actividades de recopilación de información, interpretación visual de imágenes y trabajo de campo que permiten conocer las particularidades de la zona de estudio y generar las hipótesis para los mecanismos identificados en relación con los factores que condicionan su ocurrencia.

El insumo principal para la zonificación de amenaza lo constituye el denominado inventario de procesos, el cual es la representación gráfica de los mecanismos de falla y magnitud de los movimientos en masa existentes y su distribución; la erosión superficial y rasgos indicativos del posible origen de un movimiento en masa pueden ser también incluidos en este inventario. Esta representación puede incorporar informa-

ción multitemporal para análisis de frecuencia de ocurrencia. Las técnicas, fuentes de información y requerimientos para la elaboración del inventario de procesos se presentan en el numeral 3.1 de este documento. Los factores causales de la ocurrencia de un movimiento en masa, estos se dividen en condicionantes y detonantes, de manera que agrupan la mayoría de los que se han utilizado en trabajos de zonificación de amenaza. Diferentes autores han publicado revisiones dirigidas a establecer los factores o combinación de factores y su relevancia en la ocurrencia de movimientos en masa de determinados mecanismos (Varnes, 1984; Dikau et al., 1996; Turner & Schuster, 1996; Popescu, 2002; van Westen et al., 2008). Se debe tener presente que el tipo e importancia de cada factor considerado para explicar la posible ocurrencia de un movimiento en masa depende del marco geoambiental (condiciones climáticas, relieve, marco geológico, evolución geomorfológica y procesos) en el que se desarrolle la zonificación y puede diferir sustancialmente de un área a otra debido a diferentes condiciones del terreno (Corominas et al., 2013); por lo tanto no es posible establecer reglas estrictas sobre el tipo de dato a ser usado, y la selección de los mismos se debe hacer con base en el conocimiento integral del área de estudio. En esta guía se propone usar los factores que se consideran más relevantes para un adecuado análisis de amenaza, sin restringir la posibilidad de incluir los que el usuario de la guía considere indispensables y aplicables para su área de estudio.

Los factores condicionantes están representados en las temáticas de geología, geomorfología y cobertura de la tierra y uso del suelo, y configuran la predisposición del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa, considerándose intrínsecos o inherentes al área de estudio dado que prácticamente no varían en el tiempo. Debido a la complejidad en el análisis y poca disponibilidad de información relacionada con la actividad antrópica y su variación temporal, se ha incluido la temática de cobertura de la tierra y uso del suelo como un factor condicionante de inestabilidad y no como un detonante. Factores tales como origen de los materiales, litología, pendiente, meteorización, morfología, vegetación, uso del suelo, entre otros, y su rela-



» **Figura 1.1.** Marco de referencia para el análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000.

Fuente: autores.

ción con la ocurrencia de movimientos en masa, son obtenidos a partir de la cartografía de unidades geológicas superficiales (UGS), subunidades geomorfológicas y de cobertura de la tierra y usos del suelo.

Los factores naturales que modifican las condiciones de estabilidad y se consideran los detonantes más comunes son la lluvia y el sismo (Turner & Schuster, 1996). Estos tienen regularmente una frecuencia de ocurrencia que permite incluir el componente temporal en el análisis de amenaza, junto con la definición de escenarios de análisis. En este caso se proponen, de acuerdo con la disponibilidad de información, el cálculo de frecuencias de ocurrencia, probabilidades asociadas o cálculo de probabilidades de excedencia de los umbrales, definidos a partir de la relación histórica entre la ocurrencia de eventos posiblemente detonados por alguno de estos factores.

### 1.1.2 Análisis de la susceptibilidad

Para el análisis de la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa se propone la aplicación de un método estadístico bivariado combinado con el conocimiento de la zona de estudio a partir de subunidades geomorfológicas y criterios de campo.

Independiente del método, el inventario de procesos morfodinámicos es el insumo más importante para establecer la relación entre un factor o combinación de factores condicionantes y la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa. El análisis del inventario de procesos morfodinámicos debe permitir plantear las hipótesis sobre las zonas más o menos propensas a la inestabilidad (susceptibles), las cuales serán comprobadas y validadas a partir de estadística y criterio experto. Con el fin de estimar la

contribución relativa de cada factor condicionante, se propone la aplicación de un método estadístico bivariado denominado “Pesos de Evidencia” (WofE, por sus siglas en inglés), el cual se basa en teoría de probabilidad bayesiana para determinar la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa dado que existen unos factores condicionantes. Este método ha sido aplicado en el SGC a escala 1:25.000 en diferentes entornos geoambientales como Popayán (SGC, 2015b), Combeima (INGEOMINAS, 2009) y en los Ríos Bolo y Fraile (INGEOMINAS, 1998). De igual forma en la literatura internacional se han presentado varias aplicaciones de este método para el cálculo de la susceptibilidad (Pardeshi et al., 2013; Süzen & Doyuran, 2004). Para el análisis de susceptibilidad por procesos tipo flujo o caída, se propone la definición de subunidades y rasgos geomorfológicos indicativos de susceptibilidad, las cuales pueden ser validadas mediante simulaciones. Todos los resultados se deben validar con el inventario de procesos morfodinámicos.

Las categorías de susceptibilidad están basadas en el número o densidad de deslizamientos por área, o también en la probabilidad espacial relativa a la zona de estudio.

Una vez obtenida la susceptibilidad del terreno debe ser representada cartográficamente en cuatro clases o categorías (baja, media, alta y muy alta).

### 1.1.3

#### Caracterización de la amenaza

Una vez definida la susceptibilidad, esta se debe caracterizar con la frecuencia de ocurrencia de los tipos de movimientos en masa analizados. Idealmente se deberían conocer todos los movimientos en masa detonados por un mismo factor (lluvia o sismo) en una región determinada con el fin de definir la probabilidad temporal de ocurrencia de un movimiento en masa. Sin embargo, considerando las limitaciones de información se pueden emplear alternativas con base en métodos estadísticos o el conocimiento del área como en el caso de los métodos heurísticos o geomorfológicos, frecuencias absolutas, relativas, indirectas, distribución de probabilidad empírica o correlación con umbrales de lluvia (Corominas et al., 2013).

En el mejor de los casos un análisis de amenaza por movimientos en masa requiere una aproximación multiamenaza que integre tanto los diferentes tipos de proceso que pueden ocurrir en la zona de estudio, como sus características particulares, relación con los factores condicionantes y detonantes y probabilidades espaciales temporales y de magnitud (Corominas et al., 2013; Corominas & Mavrouli, 2011a). De esta forma se deberían plantear los escenarios de amenaza basados en las características de cada tipo de proceso y la incidencia en los escenarios de riesgo que se puedan generar por su materialización.

Sin embargo, dado que la presente guía metodológica constituye una primera aproximación para el análisis de la amenaza a escala media con información limitada, se propone agrupar los movimientos en masa de acuerdo con los siguientes tipos:

- a) Deslizamientos: incluye movimientos tipo deslizamiento rotacional o deslizamiento traslacional en suelo o roca. En este grupo se pueden incluir los procesos en laderas tipo flujo que hacen parte de la zona de alimentación de flujos de detritos o flujos de lodo.
- b) Considerando la propuesta de Skempton & Hutchinson (1969), los deslizamientos se pueden clasificar según la relación Profundidad (D)/Longitud (L), en superficiales y profundos, donde:
  - Superficiales:  $D/L < 0,1$
  - Profundos:  $D/L = 0,15$  a  $0,33$
- c) Caídas: incluye movimientos tipo caída en suelos o rocas. Se pueden incluir también en este tipo los movimientos tipo volcamiento.
- d) Flujos: en este tipo se incluyen los procesos tipo flujo de detritos, flujo de lodos o avenida torrencial (Ver numeral 1.2).
- e) Reptación: término utilizado para describir movimientos lentos y extremadamente lentos (Hungry et al., 2014).

Como se presenta más adelante, considerando el tipo de movimiento se aplicarán diferentes criterios de análisis y evaluación. La amenaza por deslizamientos será analizada con base en los resultados del método estadístico bivariado,

mientras que los movimientos tipo flujo y caída serán analizados con base en subunidades geomorfológicas. La reptación, por su parte, solo será identificada y representada en el resultado final del estudio.

La categorización de la amenaza por movimientos en masa se basa en descriptores cualitativos que se definen a partir de la aplicación de matrices que relacionan la posibilidad de ocurrencia (susceptibilidad) con la frecuencia relativa de ocurrencia.

Al final la zonificación de amenaza contiene no solo las categorías de amenaza alta, media y baja, sino también, todas aquellas evidencias de inestabilidad que sean identificadas en el inventario de procesos morfodinámicos.

## 1.2 DEFINICIONES

El marco conceptual propuesto en esta guía se basa en definiciones y terminología sobre gestión del riesgo por movimientos en masa aceptadas tanto a nivel nacional como internacional (INGEOMINAS, 2001; AGS, 2007; Fell et al., 2008; UNISDR, 2009; Corominas et al., 2013; SGC & UNAL, 2015a; Corominas et al., 2015), que han sido adaptadas y complementadas con las definidas en la Ley 1523 de 2012 y el Decreto 1077 de 2015. Por facilidad de consulta se presentan en orden alfabético.

- » **Amenaza:** evento físico o condición peligrosa de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, capaz de 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 y los recursos ambientales. La caracterización y descripción de la amenaza por movimientos en masa debe incluir su ubicación, clasificación, geometría, magnitud o intensidad, y se evalúa en términos de frecuencia de ocurrencia. La magnitud se suele expresar cuantitativamente como una media del tamaño del evento (volumen o área) y la intensidad (relacionada con el potencial destructivo del evento) con parámetros cuantitativos o cualitativos tales como velocidad máxima del evento, desplazamiento total, desplazamiento diferencial, profundidad, descarga pico por unidad de ancho o energía cinética por unidad de área.
- » **Avenida Torrencial:** adaptando la definición presentada en la Metodología para la Evaluación del Riesgo en los POMCAS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL, 2013), las avenidas torrenciales son procesos tipo flujo que incluyen eventos generados sobre ríos y quebradas de alta montaña y en cuencas con características geomorfológicas que favorecen una alta acumulación de sedimentos sobre el cauce, cambios drásticos en el gradiente del afluente, alta densidad de drenaje y eventos de precipitación. Sus daños a la población y a la infraestructura son de magnitud mayor, al igual que el tiempo necesario para recuperación de las cuencas después de un desastre ocasionado por este fenómeno. Para los efectos de esta guía, los flujos de detritos y flujos de lodos definidos en el PMA: GCA (2007), cuyas características geomorfológicas se ajusten a las anteriormente descritas, se tomarán como equivalentes a avenidas torrenciales.
- » **Erosión:** adaptando la definición presentada en el estudio *Indicadores de erosión en áreas áridas y semiáridas* (FAO, 2014, citado por IGAC & Corantioquia, 2014), la erosión es un proceso de pérdida continua y selectiva de materiales ocasionada por agentes naturales o antrópicos. Cuando la erosión se produce sin intervención antrópica, se denomina erosión geológica o natural, debido a la acción de agentes como el agua (hídrica), viento (eólica), deshielo (glaciar), entre otros, sobre los materiales de las capas superficiales roca o suelo; de lo contrario se considera erosión antrópica o acelerada, en la que el hombre altera los procesos naturales principalmente con prácticas como el laboreo en el sentido de la pendiente, cultivos, compactación del terreno, deforestación, quemas, minería, entre otras actividades. En el caso de zonificación de amenazas por movimientos en masa, es importante caracterizar la ero-

sión superficial que puede dar origen a movimientos en masa, principalmente la relacionada con el agente agua en forma de erosión pluvial o hídrica y erosión fluvial; la primera se puede clasificar en surcos, cárcavas y hondonadas o tierras malas y la segunda, en socavación lateral.

- » **Frecuencia:** representa el número de eventos o de procesos en un intervalo de tiempo dado. Puede ser evaluada a partir de datos empíricos.
- » **Intensidad de un movimiento en masa:** conjunto de datos espacialmente distribuidos relacionados con el potencial destructivo de un movimiento en masa. Estos datos pueden ser descritos en términos cuantitativos o cualitativos de atributos como velocidad, desplazamiento total, desplazamiento diferencial, profundidad de falla, descarga pico por unidad de ancho, energía cinética por unidad de área, entre otros.
- » **Intervalo de recurrencia o periodo de retorno:** intervalo de tiempo promedio en que se espera que ocurra un evento de cierta magnitud. Es el inverso de la probabilidad anual.
- » **Magnitud de un movimiento en masa:** es una medida del tamaño del movimiento en masa. Puede ser descrita cuantitativamente por su volumen o indirectamente por su área. Los descriptores usados se pueden referir a varias partes del movimiento en masa como su escarpe o zona de depósito.
- » **Movimiento en masa:** equivale a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa 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.
- » **Probabilidad de excedencia:** la probabilidad de que ocurra un evento con una magnitud igual o mayor que cierto valor en un periodo de tiempo.
- » **Susceptibilidad a movimientos en masa:** medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área. Su determinación se basa solamente en el análisis de factores intrínsecos o condicionantes y puede también incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos en masa existentes o potenciales. Los mapas de susceptibilidad contienen información sobre el tipo de deslizamiento que puede ocurrir y sobre su posibilidad de ocurrencia espacial en términos de identificación de las áreas de iniciación más probables y la posibilidad de extensión (retrogresión o progresión — distancias de viaje).
- » **Umbral:** el mínimo nivel de alguna cantidad necesaria para que un proceso tenga lugar o suceda un cambio de estado.
- » **Zonificación:** la división del territorio en áreas o dominios homogéneos y su categoría de acuerdo al nivel de susceptibilidad, amenaza o riesgo actual o potencial.

### 1.3 ALCANCE

Esta guía presenta una propuesta metodológica para realizar análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, adaptando los requerimientos presentados por la normatividad de ordenamiento territorial y gestión del riesgo (Decreto 1807 de 2014, 1077 de 2015 y Ley 1523 de 2012) y considerando el estado del conocimiento actual en la temática. Se presentan conceptos, procedimientos y técnicas que tienen como base principios de viabilidad, de acuerdo con la información disponible y las capacidades técnicas de sus posibles usuarios, de aplicación en diferentes áreas y de gradualidad en el conocimiento.

Es un aporte del SGC a los procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo por movimientos en masa elaborado a partir de revisión bibliográfica, discusión con expertos y la experiencia del SGC en este tipo de trabajos, sin pretender constituir una norma, tratado o compendio



exhaustivo de todas las técnicas para el análisis de amenaza. Es una herramienta práctica que permite adelantar estudios con una rigurosidad técnica mínima para la obtención de resultados de calidad.

Dado que la amenaza por movimientos en masa constituye un problema con una complejidad espacio-temporal implícita que requiere de la interacción multidisciplinar y el adecuado conocimiento de las particularidades de cada zona de estudio, el juicio experto es un factor predominante al momento de aplicar los conceptos aquí presentados, por lo que la metodología propuesta no debe ser entendida como una receta o manual que dirige al usuario por un proceso rígido e inmovible. La intención del documento es servir de guía para la conceptualización de los aspectos a tener en cuenta para el análisis de la amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, así como para el levantamiento y representación de información temática que sirve de base en procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo. De esta forma, se pretende disminuir la subjetividad de algunos procedimientos, permitiendo además el seguimiento y comparación de los resultados obtenidos. Se debe tener presente que en la ejecución de este tipo de estudios es indispensable y obligatorio el levantamiento de información temática de geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo a la escala de trabajo, a partir de la cual serán elaborados los respectivos productos cartográficos (mapas). Sin embargo, no es el objetivo de esta guía presentar los conceptos, técnicas o metodologías para la elaboración de cartografía temática. La guía se enfoca en el uso de los datos que se pueden tomar de esta cartografía para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, en un escenario en que se supone esta información ha sido elaborada y está disponible.

El análisis de amenaza por movimientos en masa es un proceso dinámico que requiere de actualizaciones periódicas y deberá mejorarse conforme se adquieren niveles de información y conocimiento más detallados de las áreas de estudio, por lo que esta metodología es una primera aproximación ante la multiplicidad de variables y escenarios que por las característi-

cas geoambientales y socioculturales del país se pueden presentar.

Es importante aclarar que aspectos relacionados con condición social, cultural y económica particular de cada zona de estudio y su incidencia en la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa no son tratados en esta guía.

La escala de trabajo definida (1:25.000) está ajustada de acuerdo con las exigencias de las herramientas para planificación territorial y gestión del riesgo actualmente vigentes a nivel regional (POMCA y POT), y se enmarca dentro de los niveles de zonificación recomendados en la literatura especializada en el tema (Fell et al., 2008). Se considera suficiente para esta escala de trabajo caracterizar la amenaza a partir de la definición de áreas de posible ocurrencia regional de movimientos en masa (áreas fuente o zonas de inicio) para movimientos tipo deslizamiento y áreas fuente y zonas posiblemente afectadas por el alcance de movimientos tipo flujo o caída. Todos los resultados deben ser validados a partir de la evidencia recopilada en el inventario de procesos morfodinámicos.

Dado que la metodología propuesta se basa en el inventario de procesos morfodinámicos, está condicionada a un mapeo exhaustivo que permita establecer su distribución espacial, densidad, tipo, frecuencia de ocurrencia y relación con condicionantes o detonantes. Áreas de estudio donde no sea posible mapear procesos no pueden ser analizadas con esta metodología.

La actividad antrópica ha sido considerada dentro del análisis de factores condicionantes en la temática cobertura de la tierra y uso del suelo y no como un detonante como se plantea en el Decreto 1807 de 2014. Esta propuesta pretende superar la posible falta de información geoespacial en algunas zonas del territorio y disminuir la complejidad en la representación de la dinámica de la actividad antrópica como un detonante en términos de frecuencia o probabilidad. Esta variación en el concepto de condicionantes y detonantes respeta la filosofía del decreto y está en concordancia con las recomendaciones para análisis de amenaza por movimientos en masa a esta escala de trabajo presentadas por Fell et al. (2008) y Corominas et al. (2013).

De acuerdo con las normas de planificación a las que se ha ajustado esta propuesta, es posible utilizar e integrar en esta metodología los insumos temáticos disponibles a la escala de trabajo contenidos en los POT, POMCA, estudios o informes técnicos y bases de datos institucionales; siempre y cuando el análisis de esta información permita realizar una verificación y validación de las condiciones de calidad técnica. Igualmente, como se ha definido en el Decreto 1807 de 2014: “En los casos de ausencia total o parcial de la información, se deben establecer las acciones técnicas, institucionales y financieras necesarias para elaborar esta información” a la escala de análisis.

Es importante reconocer que en algunas zonas del país existen procesos de investigación y esfuerzos muy valiosos en torno a la evaluación de amenaza por movimientos en masa a diferentes escalas, liderados por grupos de investigación de instituciones y entidades de carácter público y privado cuya relevancia debe ser evaluada antes de considerar la aplicación de la metodología propuesta en este documento. No se pretende desconocer las limitaciones de la guía en cuanto al conocimiento de las particularidades de las zonas de estudio que determinan sus condiciones de amenaza.

Finalmente, por considerarse fuera del objetivo de la guía, no se incluyen temas relacionados con costo de estudios o fuentes de financiación. Tampoco se incluyen temas de gestión del riesgo tales como educación, prevención o mitigación que hacen parte de procesos integrales en los que esta guía es solo un componente del conocimiento de la amenaza.

### 1.3.1 Escenarios de amenaza

En un análisis de amenaza por movimientos en masa se debe usar toda la información disponible para definir las zonas donde ocurren o pueden ocurrir procesos de un tipo particular y con una magnitud y frecuencia de ocurrencia dada. Esto implica que es necesario determinar todas las posibles combinaciones de las características geoambientales (tipos de procesos, condicionantes y detonantes) que pueden incidir en la probabilidad espacial, probabilidad de magnitud y probabilidad temporal. Cada una de estas combinaciones determinará un escenario específico de amenaza, el cual debe ser valorado de acuerdo con el propósito del análisis y con criterios enfocados a la gestión integral del riesgo.

La metodología aquí descrita está dirigida específicamente al análisis de procesos en taludes naturales, a partir de la evidencia de ocurrencias conocidas (Inventario de procesos morfodinámicos) y mediante la combinación de técnicas cuantitativas y cualitativas cuya validez y posibilidad de aplicación debe ser definida por los expertos que ejecutan estos estudios.

El análisis de procesos de inestabilidad inducidos por actividad volcánica o deshielo de áreas nevadas no está incluido en esta guía. Este tipo de escenarios se podrán incluir por los usuarios en el marco de los factores condicionantes y detonantes propuestos. La Dirección de Geoamenazas del SGC ha publicado diferentes trabajos sobre evaluación de amenaza volcánica que se recomienda sean consultados para la toma de decisiones de planificación y gestión del riesgo multiamenazas.



An aerial photograph of a mountainous region. The landscape is characterized by rolling green hills and valleys. A river winds through the lower left portion of the image, with a small town or village situated along its banks. The terrain is a mix of lush green vegetation and some exposed brown soil, possibly from erosion or deforestation. The sky is filled with soft, white clouds, and the overall lighting is bright and natural.

2

# ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA BÁSICA



# | Capítulo 2 |

En el marco de los Decretos 1807 de 2014 y 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio reglamentarios de la incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), se han definido algunos requerimientos técnicos relacionados con las áreas de estudio e insumos de información básica para la elaboración de estudios de amenaza por movimientos en masa, los cuales han sido considerados para el planteamiento de la propuesta presentada en este documento. Existen también algunos criterios que se pueden considerar con base en las recomendaciones presentadas en la literatura especializada (Fell et al., 2008) y que han sido corroborados y ajustados de acuerdo con la experiencia del SGC.

En el marco de los POT, la finalidad de los estudios de amenaza por movimientos en masa es la localización de las áreas con condición de amenaza, las cuales se definen como:

Zonas o áreas del territorio zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo. La definición de estas zonas se debe hacer a partir de la elaboración de estudios básicos de amenaza en suelos urbanos, de expansión urbana y rural. (Decreto 1807 de 2014 Art. 3)

Este es el insumo principal para la definición de áreas en las que se requerirá hacer estudios de mayor detalle.

De conformidad con las clases de suelo establecidas en la Ley 388 de 1997:

Los estudios de amenaza básicos en suelo rural se deben elaborar como mínimo a escala 1:25.000. Sin embargo, aquellos municipios o distritos que cuenten con centros poblados rurales que por su alto grado de exposición a la ocurrencia de fenómenos naturales han sido afectados o tienen la posibilidad de ser afectados, deben adelantar estudios básicos como mínimo a escala 1:5.000.

La propuesta metodológica aquí presentada está orientada a la elaboración de estudios básicos de amenaza en suelo rural.

Se adelantará este tipo de estudios en todas las zonas de relieve escarpado, montañoso y ondulado con pendientes del terreno mayor a cinco (5) grados, más los taludes marginales de cauce, así como, las zonas planas que pueden recibir los efectos de los movimientos en masa (Decreto 1807 de 2014 Art. 8).

Se debe tener en cuenta que para la elaboración de estudios de amenaza en suelo rural, la reglamentación permite hacer uso de la información contenida en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) aprobados, en los que se hayan incluido análisis de amenazas por movimientos en masa. De igual forma, toda la información existente relacionada con la temática puede ser usada de acuerdo con el conocimiento de la zona de estudio y el criterio experto de quien esté adelantando los estudios.

A continuación se describen algunos aspectos a tener en cuenta antes de realizar el levantamiento de información temática y análisis de amenaza, con el fin de unificar los criterios de aplicación de la metodología propuesta.

## 2.1 ESCALA DE TRABAJO Y ÁREA DE ESTUDIO

Con el fin de armonizar el producto del análisis de amenaza por movimientos en masa con otros instrumentos de planificación territorial y gestión del riesgo, se propone como área de estudio la cuenca hidrográfica, tanto para el levantamiento de la información temática, como para

la zonificación de susceptibilidad y amenaza. Como se observa en la Tabla 2.1, en zonificación de amenaza y riesgo por movimientos en masa, la escala 1:25.000 constituye una frontera entre la escala regional y la escala semidetallada, a partir de la cual se recomienda considerar límites en los tamaños de las áreas a estudiar. Con base en la experiencia del SGC en este tipo de estudios y de acuerdo con el alcance de la metodología propuesta, se recomienda aplicarla en áreas de estudio de hasta 500 km<sup>2</sup>.

» **Tabla 2.1.** Relación entre clases de escalas, niveles de estudio y características de interés para zonificación de amenaza por movimientos en masa

CARACTERÍSTICAS	NIVELES DE ESTUDIO					
	NACIONAL	DEPARTAMENTAL	REGIONAL	SEMI DETALLADA	DETALLADA	DISEÑO
ESCALAS	< 1:500.000	1:250.000	1:100.000	1:25.000	1:10.000	> 1:1.000
LÍMITES	y 1:250.000	y 1:100.000	y 1:25.000	y 1:10.000	y 1:1.000	
	PEQUEÑA		MEDIA		GRANDE	
UNIDAD GEOGRÁFICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>País</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Departamentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cuencas hidrográficas, provincias y regiones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Subcuencas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Municipios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sitios puntuales</li> </ul>
EXTENSIÓN GEOGRÁFICA	> 1.000.000 km <sup>2</sup>	25.000 km <sup>2</sup>	1.500 km <sup>2</sup>	300 km <sup>2</sup>	15 km <sup>2</sup>	< 1 km <sup>2</sup>
OBJETIVOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formulación de planes de desarrollo.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Planes de ordenamiento territorial</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de proyectos en etapas de factibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudios y soluciones a proyectos puntuales</li> </ul>
Alcances	<ul style="list-style-type: none"> <li>Política de prevención y atención de desastres</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Planes de manejo de cuencas.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ordenamiento territorial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño y ejecución de obras civiles</li> </ul>
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>Información muy general, para la toma de decisiones de grandes proyectos en las etapas de planificación y de desarrollo</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de proyectos a nivel de prefactibilidad</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Planeamiento urbano.</li> <li>Análisis de alternativas de proyectos viales</li> <li>Localización procesos denudativos</li> </ul>	
Nivel de Investigación y/o de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>SGC</li> <li>IDEAM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GOBERNACIONES</li> <li>PROVINCIAS</li> <li>ANLA</li> <li>CAR´s</li> <li>INVIAS</li> <li>Regiones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CAR´s</li> <li>Corporaciones Regionales de Desarrollo</li> <li>Universidades e Instituciones de Investigación</li> <li>INVIAS.</li> <li>ANLA</li> <li>Firmas Consultoras</li> <li>Áreas Metropolitanas</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Áreas Metropolitanas</li> <li>Municipios</li> <li>Áreas Urbanas</li> <li>Empresas Privadas</li> <li>Firmas Consultoras</li> </ul>	

Fuente: adaptado de Ojeda (1996).

Una de las bondades de emplear como área de trabajo la cuenca hidrográfica, es que permite considerar al mismo tiempo varias amenazas: movimientos en masa, flujos, inundaciones, entre otras, que a mediano y largo plazo contribuyen con la toma de decisiones efectivas de ordenamiento territorial. Esta unidad funciona como un sistema con características y límites geomorfológicos definidos, que son determinantes en la ocurrencia de movimientos en masa y el análisis de amenaza. Un ejemplo de esta consideración es el hecho de que los cambios en la cobertura de la tierra y uso del suelo inciden directamente en el comportamiento hidrológico de la cuenca, el cual a su vez se puede relacionar con la ocurrencia de movimientos en masa. Finalmente, y como es presentado por Dourojeanni et al. (2002, citado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014):

En las cuencas, se produce la interrelación e interdependencia entre los sistemas físicos y bióticos y el sistema socioeconómico [...] la dependencia de un sistema hídrico compartido y de los caminos y vías de acceso y el hecho de que deban enfrentar riesgos similares, confieren a los habitantes de una cuenca características socioeconómicas y culturales comunes.

## 2.2 ÁREA MÍNIMA CARTOGRAFIABLE

La zonificación de amenaza por movimientos en masa se basa en la discretización del territorio en unidades temáticas, de acuerdo con los factores que se consideren relacionados con la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo).

A escala 1:25.000 el levantamiento de cartografía temática debe seguir algunos parámetros de representación cartográfica, con el fin de que el contenido de la cartografía conserve los criterios con los cuales se generaron las diferentes unidades y permita su distinción cuando se presente en formato análogo (Salitchev, 1979). Con este fin, se ha definido el área mínima cartografiable como la superficie menor que puede ser

representada sobre un mapa. Basados en la propuesta de Salitchev (1979), se recomienda que el área mínima cartografiable sea de 4 x 4 mm para la representación de información temática (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo), con el fin de garantizar operatividad y adecuada lectura de los mapas. Esto quiere decir que para la escala 1:25.000 el área mínima cartografiable de las temáticas será de 10.000 m<sup>2</sup>.

En la elaboración del inventario de procesos morfodinámicos se debe hacer una excepción a esta medida, dado que es necesario representar todos los movimientos en masa identificados en el área de estudio, incluso los que tengan áreas menores que la mínima cartografiable.

## 2.3 CARTOGRAFÍA BASE

Dado que los insumos temáticos para la zonificación a escala 1:25.000 serán relacionados en el capítulo tres, a continuación se presentan los requerimientos de información cartográfica básica para zonificación de amenazas por movimientos en masa.

Con el fin de adelantar los estudios de amenaza por movimientos en masa favoreciendo el uso de Sistemas de Información Geográfica-SIG, es recomendable el uso de la cartografía básica digital que produce el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) por ser el ente encargado de:

Proveer información básica para los sectores público, privado y académico porque contribuye a la visualización y el análisis integral del territorio, a la toma de decisiones y, en consecuencia, al desarrollo sostenible además, producir y divulgar información georreferenciada en las áreas de Cartografía, Agrología, Catastro y Geografía (IGAC, 2005a).

Esta información reúne las condiciones necesarias para ser utilizada en un Sistema de Información Geográfica y proporciona los datos fundamentales necesarios para el desarrollo de la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales-ICDE, cuyo objetivo es organizar la producción de datos geográficos y facilitar su acceso y uso para el desarrollo del país.

En la página web del IGAC (<http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/Mapas-de-Colombia/Descargas>) se puede descargar gratuitamente en forma integrada o por planchas la cartografía básica a escala 1:500.000, 1:100.000 y 1:25.000 en formato geodatabase actualizada a octubre de 2016, así como las licencias de uso y un documento técnico de uso y manejo.

### 2.3.1 Sistema de referencia

Tanto los objetos geográficos como los productos deberán estar debidamente referenciados y proyectados de acuerdo a los tipos de coordenadas manejados en Colombia y lineamientos exigidos en el documento *Tipos de Coordenadas manejados en Colombia* (IGAC, 2004).

## 2.4 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM)

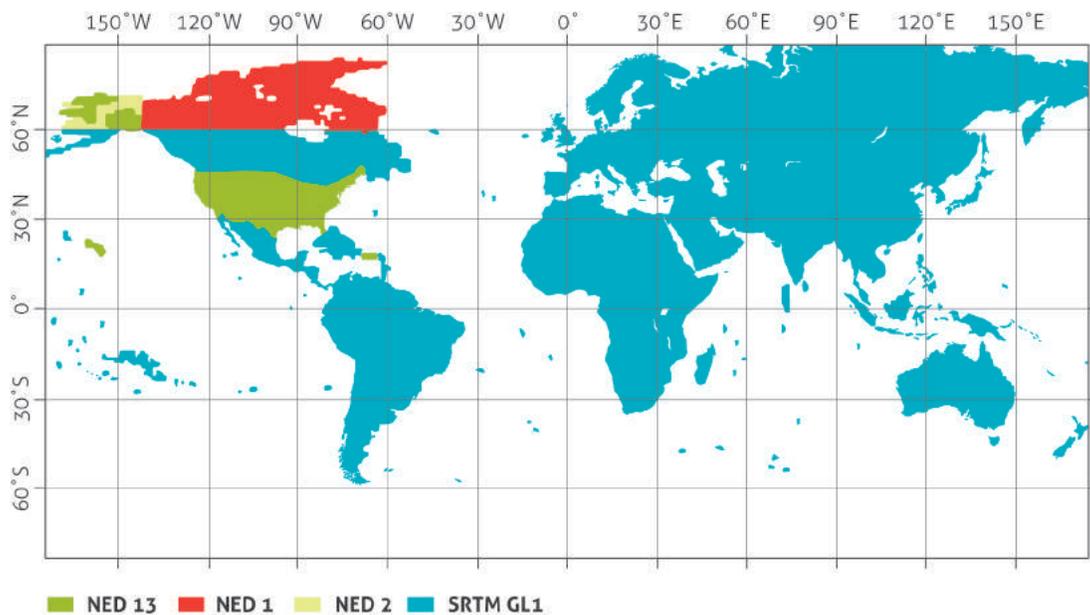
Para la zonificación de amenazas por movimientos en masa es de vital importancia contar con un DEM (*Digital Elevation Model*, por sus siglas en inglés) con cubrimiento total en el área

de estudio, el cual servirá de base para el levantamiento de las temáticas relacionadas con los factores condicionantes y para la operación con datos espaciales. Los DEM de los satélites ALOS y SRTM que se describen a continuación corresponden a los más utilizados a escalas medias, y que tiene cubrimiento nacional como se muestra en la Figura 2.1. Además estos modelos son ampliamente usados por su resolución y fácil adquisición. Es importante aclarar que se deben usar los DEM con la mejor resolución espacial disponible en el área de estudio, por lo cual es conveniente procurar por su consecución.

### 2.4.1 DEM NASA

En febrero del 2000 la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geo-Espacial (NGA) y las Agencias Espaciales de Alemania y de Italia lanzaron la Misión *Shuttle Radar Topography Mission SRTM* (NASA, 2017). Esta misión produjo el modelo de elevación digital (DEM) de más alta resolución de la superficie terrestre (Farr et al., 2007).

Este DEM fue producido a una resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m en el Ecuador) para casi todo el globo terráqueo,



» **Figura 2.1.** Cubrimiento geográfico del DEM SRTM1

Fuente: ASF (2015)

entre las latitudes 60 grados norte y 57 grados sur (Farr et al., 2007) con un error de altitud vertical medio de 6,2 m (nivel de confianza de 90%) y un error de geoubicación de 9 m para Suramérica (Rodríguez, et al., 2006).

### 2.4.2 DEM ALOS PALSAR

El satélite ALOS fue lanzado el 24 de enero de 2006 mediante un cohete H-II desde la base de Tanegashima por la JAXA (Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial) y fue diseñado para mantenerse operativo de tres a cinco años (mayo de 2006 a abril 22 de 2011). ALOS-1 fue una misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa JAXA.

El PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar): este sensor colectó imágenes de radar en escenas de 50 km x 70 km cada 45 días aproximadamente. Estas están disponibles según 3 niveles de procesamiento (1.0-Imagen Cruda, 1.1-Datos comprimidos y

1.5-Imagen expandida) en formato CEOS con una resolución radiométrica de 16 bits y una resolución espacial de 12,5 m (GeoSpatial, s.f.).

### 2.4.3 Modelos digitales de elevación a partir de curvas de nivel

Como fuente de información para la elaboración del DEM se suele utilizar en nuestro medio la digitalización de las curvas de nivel de la cartografía base. Considerando la disponibilidad de información cartográfica, para la elaboración del DEM se recomienda el uso de cartografía base a escala 1:25.000 o de mayor detalle, con tamaños de pixel utilizando un factor de escala de X/1.000, es decir, que por ejemplo para escalas 1:10.000 se obtendrá un DEM con tamaño de pixel de 10 X 10 m. Es importante a criterio experto evaluar las condiciones actuales del terreno y su adecuada representación en la cartografía disponible.



A landscape photograph showing a valley with green hills and a cloudy sky. The hills are covered in dense green vegetation, and the valley floor is a mix of green fields and rocky outcrops. The sky is bright with scattered white clouds. The overall scene is a natural, scenic view of a mountainous region.

3

# CARACTERIZACIÓN GEOAMBIENTAL



# | Capítulo 3 |

Tal como se presentó en el capítulo uno, la primera etapa del proceso de zonificación de amenaza es la definición de las características geoambientales de la zona de estudio, las cuales permiten la formulación y comprobación de una hipótesis con la que se pueda establecer la relación entre diferentes factores geoambientales y la ocurrencia de movimientos en masa. Dado que el objetivo final es una zonificación tomando como base el inventario de procesos morfodinámicos, todos los datos de entrada para el cálculo de susceptibilidad deben ser representados espacialmente.

De acuerdo con el enfoque propuesto, la caracterización geoambiental para zonificación de amenaza por movimientos en masa comprende el levantamiento de la siguiente información: inventario de procesos morfodinámicos, factores condicionantes y factores detonantes. De estos, el más relevante es el inventario de procesos morfodinámicos, dado que brinda información sobre la ubicación de los procesos, tipos, factores causales, frecuencia de ocurrencia, volúmenes y daños que han causado (van Westen et al., 2008). Como se verá más adelante, el levantamiento y almacenamiento de información de inventario se basa en los lineamientos propuestos por SGC (2015d). Los factores condicionantes son una colección de datos espaciales que, de acuerdo con las hipótesis planteadas, tienen un efecto en la ocurrencia de movimientos en masa y son utilizados tanto en la explicación de los procesos existentes, como en los que se espera puedan ocurrir en el área. Los factores detonantes se refieren a estímulos externos sobre el terreno que modifican sus condiciones de estabilidad tales como lluvias intensas, sismos, erupciones volcánicas o erosión de cauces (Wieczorek, 1996). Es importante tener en cuenta que en algunos casos los movimientos en masa pueden ocurrir sin un

detonante aparente, o por su edad, no es posible relacionarlos con un detonante específico, por lo que se dificulta la labor del cálculo de frecuencias de ocurrencia (Guzzetti et al., 2012).

Las relaciones de causalidad entre la ocurrencia de movimientos en masa y los factores condicionantes y detonantes dependen de las particularidades geoambientales de las zonas de estudio y pueden variar incluso entre lugares semejantes. Es importante que el análisis del inventario de procesos morfodinámicos, la experiencia de los investigadores, el conocimiento del área de estudio, los insumos de información disponibles y los objetivos de los análisis sean considerados al momento de definir los factores a tener en cuenta para realizar la zonificación de amenazas. Autores como Varnes (1978) y Dikau et al. (1996) han presentado en forma detallada análisis sobre las principales causas para la ocurrencia de cada tipo de movimiento en masa, las cuales pueden ser representadas directa o indirectamente mediante el levantamiento y caracterización de los factores condicionantes (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo) y detonantes (lluvia y sismo) para zonificación de amenazas. Cruden & Varnes (1996) presentan tres condiciones causantes de movimientos en masa, que se busca sean representadas directa o indirectamente mediante el levantamiento de información temática:

1. Incremento de esfuerzos cortantes
2. Materiales con baja resistencia al corte
3. Reducción de la resistencia al corte del material

De acuerdo con los autores, el incremento en los esfuerzos cortantes en una ladera o talud puede ocurrir por procesos que impliquen remoción

del soporte lateral, imposición de sobrecargas, esfuerzos transitorios como los producidos por explosiones o sismos y por el levantamiento o inclinación del terreno producto de la actividad tectónica.

Es importante reconocer procesos de erosión en la base de las laderas que puedan generar escarpes o inclinación del talud más allá de su condición natural, los cuales pueden ser producto de la acción de corrientes, ríos, glaciares, oleaje y movimientos en masa. Causas antrópicas como excavaciones, minería y canales, así como, la existencia de lagos o reservorios posiblemente sometidos a desembalses; la remoción de material por disolución de carbonatos, tubificación o erosión subterránea y el remoldeo producido por el movimiento del terreno en arcillas sensitivas son procesos que pueden causar movimientos en masa por pérdida de soporte lateral.

Los rellenos antrópicos, lluvia, crecimiento de glaciares, depósitos de materiales transportados sobre las laderas, depósitos volcánicos, crecimiento de vegetación, cargas estructurales, reservorios, entre otros, representan incrementos en los esfuerzos de corte por imposición de sobrecargas.

El cambio en el campo de esfuerzos en una ladera por efectos de sismos o explosiones tanto de origen antrópico como volcánico, generan cambios transitorios en el campo de esfuerzos locales.

El levantamiento o inclinación del terreno puede ser causado por actividad tectónica o volcánica, cuya respuesta en el paisaje se puede representar, por ejemplo, en laderas muy inclinadas producto de la incisión pronunciada de los drenajes.

La presencia de materiales geológicos (roca y suelo) de baja resistencia (inherente) o la presencia de discontinuidades, son factores relacionados con la ocurrencia de movimientos en masa. Los materiales pueden ser naturalmente débiles o se pueden debilitar por procesos naturales como la saturación. Materiales orgánicos, arcillas y rocas descompuestas por meteorización química, pueden tener resistencia mecánica baja; además, la naturaleza de las partículas que componen un suelo o roca y su arreglo (estruc-

tura) determinan la resistencia de material. Adicionalmente, discontinuidades como fallas, superficies de estratificación, foliación, diaclasas, fisuras, zonas de cizalla, contraste de materiales en secuencias que generan cambios de permeabilidad o intercalación de zonas plásticas y zonas frágiles, e incluso horizontes de meteorización, son el origen de características de debilidad en los materiales.

Por último, la reducción de la resistencia al corte de los materiales se puede deber a procesos de meteorización y otras reacciones fisicoquímicas (intercambio catiónico por ejemplo), hidratación de minerales arcillosos en arcillas fisuradas, fisuramiento por desecación o remoción de cargas verticales y laterales, temperaturas extremas que producen ciclos de congelación y descongelación, expansión termal y contracción, disolución y lavado de cementantes, saturación, flujo de partículas, e incluso el crecimiento de raíces.

Los factores causales de movimientos en masa pueden ser agrupados de acuerdo con las temáticas involucradas según la Tabla 3.1 (Cruden & Varnes, 1996). Por otra parte Van Westen et al. (2008) presentan una revisión esquemática de las principales capas de información requeridas para análisis de susceptibilidad y amenaza (Tabla 3.2), cuyo enfoque permite una adecuada representación de los factores condicionantes y detonantes en una zona de estudio. Es importante resaltar que las particularidades de cada zona, los tipos de movimiento en masa identificados y la disponibilidad de información definen la mayor o menor importancia de uno u otro factor y su elección; sin embargo, la revisión presentada por estos autores permite tener una visión completa de los tipos de datos requeridos para llevar a cabo estudios de zonificación de amenazas.

Dado que dentro de los objetivos de este documento se ha planteado la necesidad de disminuir la subjetividad de algunos procedimientos y brindar herramientas para el seguimiento y comparación de los resultados, en la Tabla 3.3 se presenta la selección de los factores condicionantes y detonantes mínimos recomendados en la presente metodología para el cálculo de la susceptibilidad y amenaza, de acuerdo con la escala de trabajo y la disponibilidad de información.

» **Tabla 3.1.** Lista de factores causales de movimientos en masa

<b>1 CONDICIONES GEOLÓGICAS</b>
Materiales plásticos débiles Materiales sensitivos Materiales colapsables Materiales meteorizados Materiales cizallados Materiales fisurados o diaclasados Discontinuidades en macizos o masas de suelo orientadas en la misma dirección de la ladera Discontinuidades estructurales Contraste en permeabilidades y de rigidez
<b>2 CONDICIONES GEOMORFOLÓGICAS</b>
Levantamiento tectónico Levantamiento volcánico Rebote glacial Erosión fluvial de la base del talud Erosión costera de laderas Erosión glacial de laderas Erosión de márgenes laterales Erosión subterránea Depósitos de material transportado en la base o cresta de la ladera Remoción de vegetación
<b>3 PROCESOS FÍSICOS</b>
Periodos de lluvia intensos Derretimiento súbito de hielo Precipitación prolongada Descenso de niveles de inundación o mareas altas Sismos Erupciones volcánicas Rompimiento de reservorios Contracción y expansión de suelos expansivos
<b>4 PROCESOS ANTRÓPICOS</b>
Excavación de laderas Imposición de cargas en el borde de laderas Desocupar reservorios Irrigación de laderas Sistemas de drenaje defectuosos Deforestación Minería Rellenos no técnicos Vibración artificial

Fuente: adaptada y modificada de Cruden & Varnes (1996).

Como se puede observar, las características morfométricas que pueden obtenerse del DEM han sido incluidas en la temática de Geomorfología; los factores relacionados con materiales ingenieriles tipo roca y suelo se agruparon en la

temática de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y los factores de uso del suelo, vegetación y actividad antrópica se agruparon en la temática de cobertura de la tierra y uso del suelo.

» **Tabla 3.2.** Representación esquemática de los principales datos de caracterización geoambiental para zonificación de amenaza por movimientos en masa a media

DATOS		ESCALA (1:25.000)
TIPO	SUBTIPO	
Inventario de procesos morfodinámicos	Inventario de procesos morfodinámicos	I
	Actividad de movimientos en masa	VI
	Monitoreo de movimientos en masa	MI
Factores condicionantes	DEM	VI
	Morfología de las laderas	I
	Relieve interno	MI
	Acumulación de Flujo	MI
	Litología	I
	Estructura	I
	Fallas	I
	Tipos de suelo	I
	Profundidad del suelo	PI
	Hidrología de la ladera	-
	Principales unidades geomorfológicas	I
	Unidades geomorfológicas detalladas	I
	Tipos de uso del suelo	I
	Cambios en el uso del suelo	I
	Factores detonantes	Lluvia
Temperatura / Evapotranspiración		-
Catálogo de sismos		MI
Aceleración del terreno		PI

La importancia de cada factor está indicada según la siguiente nomenclatura: VI (Muy Importante), I (Importante), MI (Moderadamente Importante), PI (Poco Importante), - (Irrelevante).

Fuente: adaptada y modificada de van Westen et al. (2008).

El inventario de procesos morfodinámicos se presenta como una capa de información independiente de acuerdo con la metodología propuesta.

Existen factores relacionados con zonas de influencia de vías o alrededor de fallas activas que se han utilizado en algunas zonas específicas de estudio, los cuales tienen un uso limitado y son omitidos en esta metodología. Este tipo de factores pueden incluirse a criterio del experto siempre y cuando su uso esté orientado a la comprobación de las hipótesis de falla propuestas.

Pese a que algunos factores se pueden analizar como capas de información independientes,

varios de estos se pueden agrupar de acuerdo con la temática a la que corresponden como en el caso de las UGS, donde la propia definición de las unidades incluye la identificación de rocas y suelos junto con sus características ingenieriles.

Como se ha mencionado, la selección de los factores para el análisis depende del conocimiento de la zona de estudio y disponibilidad de información, por lo que los factores recomendados en esta propuesta no restringen la posibilidad de usar más datos, siempre y cuando estén orientados a explicar la ocurrencia actual y futura de movimientos en masa.

» **Tabla 3.3.** Factores y temáticas para la caracterización geoambiental del área de estudio y zonificación de amenaza por movimientos en masa propuestos en esta metodología

FACTOR / TEMÁTICA	CAPAS Y TIPOS DE DATOS
INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS	Inventario de movimientos en masa y erosión
	Actividad de los movimientos en masa
	Distribución
GEOMORFOLOGÍA	Pendiente
	Curvatura
	Morfogénesis
UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES	Tipos de roca
	Meteorización
	Discontinuidades
	Aspectos estructurales
	Fallas
	Tipos de suelo
	Espesor del suelo
	Propiedades geotécnicas
	Propiedades hidrológicas
COBERTURA Y USO DEL SUELO	Cobertura de la tierra
	Uso del suelo actual
	Cambio de la cobertura de la tierra
DETONANTES	Lluvia
	Sismo

Fuente: autores.

### 3.1 INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS

Como se presentó en el capítulo uno, el enfoque metodológico para zonificación de amenaza planteado en este documento se basa en el análisis de la información recopilada en el inventario de procesos morfodinámicos en términos de sus factores causales (condicionantes y detonantes), distribución espacial y frecuencia de ocurrencia. De acuerdo con este enfoque, la elaboración de un inventario completo de procesos es fundamental para el conocimiento de la condición de amenaza del área de estudio y la obtención de resultados de calidad.

Dado que el sistema de clasificación de Movimientos en Masa adoptado en esta guía está ampliamente descrito en el documento del PMA: GCA (2007), a continuación se presentan los as-

pectos más relevantes para la elaboración del inventario de procesos con fines de zonificación de susceptibilidad y amenaza para la escala de trabajo.

En los siguientes apartados se presenta la definición del inventario de procesos morfodinámicos, contenido (atributos), fuentes de información para su elaboración y representación para la obtención de un producto cartográfico.

#### 3.1.1 Catálogo e inventario

La elaboración del inventario de procesos morfodinámicos debe permitir entender la ocurrencia de los movimientos en masa y sus características más importantes (INGEOMINAS, 2001): fecha de ocurrencia, localización, forma, dimensiones, los factores que intervinieron o intervienen en su ocurrencia o su potencialidad de ocurrencia, el mecanismo que conduce a la falla del terreno, los factores detonantes, la dinámica del movimiento, la magnitud e intensidad.

La confiabilidad del mapa de amenaza final depende de la completitud y análisis del inventario de procesos morfodinámicos, por lo que todo estudio debe empezar por su elaboración (Corminas & Mavrouli, 2011a). Existen diferentes propuestas para estandarización de la nomenclatura relacionada con el inventario de procesos morfodinámicos, de las cuales el SGC ha adoptado la presentada por el PMA: GCA (2007), en la cual además de la terminología relacionada con la temática, se presenta un formato para el inventario de movimientos en masa y características a tener en cuenta para su levantamiento y clasificación. Este formato fue actualizado y se encuentra disponible para descarga en el Sistema de Información de Movimientos en Masa – SIMMA (<http://simma.sgc.gov.co>).

Aunque dentro de los alcances de este documento no está la generación de estándares cartográficos para todas las temáticas consideradas en el análisis, en este capítulo se presenta una propuesta de representación cartográfica del inventario de procesos morfodinámicos y sus características más relevantes.

### 3.1.1.1 Definición

Las definiciones del inventario de movimientos en masa presentadas por Guzzetti et al. (2012) y Zieher et al. (2016) han sido adaptadas y tomadas como base de este documento, con el fin de estandarizar el alcance de los productos a obtener y la terminología asociada con esta temática. Es importante resaltar que, bajo el enfoque propuesto, el inventario de procesos morfodinámicos como se ha definido en esta guía metodológica no hace mención exclusiva a la representación y caracterización de movimientos en masa, sino también a otro tipo de aspectos y rasgos geomorfológicos indicativos de la ocurrencia o posible ocurrencia de un movimiento en masa.

De acuerdo con Guzzetti et al. (2012), en el inventario de movimientos en masa se registra la ubicación (como punto o polígono), fecha de ocurrencia (donde se conozca) y tipo de movimiento en masa que ha dejado señales o rastros identificables en un área. Además, puede mostrar otras características geomorfológicas relacionadas o indicativas de inestabilidad tales como:

- » Escarpes donde se generaron movimientos tipo caída o flujos.
- » Conos de abanicos aluviales y zonas donde los productos de movimientos tipo flujo o caída de rocas pueden viajar y depositarse.
- » Hondonadas (tierras malas) y otras características de erosión hídrica superficial y fluvial que pueden dar origen a movimientos en masa. Estas incluyen surcos, cárcavas, deslaves y socavación lateral, que no son fácilmente representables como un área cartográfica por la escala de trabajo.

Con base en el alcance y los recursos empleados, el inventario de procesos se puede clasificar en (Adaptado de Zieher et al., 2016):

1. Catálogo: El catálogo es una base de datos con información de la ocurrencia histórica de movimientos en masa, obtenida a partir de fuentes de información secundaria como: comunicados de prensa, reportes de la Cruz Roja, la Defensa Civil, Bomberos, entre otras. Este tipo de información presenta limitaciones técnicas, pero en un alto porcentaje da cuenta de los impactos de los eventos de manera cualitativa o cuantitativa (INGEOMINAS, 2002). Este tipo de registros está disponible en el Sistema de Información de Movimientos en Masa – SIMMA (<http://simma.sgc.gov.co>).
2. Inventario de información secundaria: incluye la información obtenida de literatura, u otro tipo de reportes, bases de datos de movimientos en masa y demás fuentes posibles de información.
3. Inventario geomorfológico: este tipo de inventario está basado en pruebas o rasgos geomorfológicos verificados tanto en el trabajo de campo como a través de la interpretación visual y procesamiento digital de imágenes. Esta información es equivalente a la encontrada en los registros tipo Inventario del SIMMA. Este inventario se divide en:
  - a. Históricos: este tipo de inventario no contiene información temporal, solo espacial.
  - b. Basados en eventos: denominado en la literatura también como inventario de

eventos (Glade & Crozier, 2005; Malamud et al., 2004; Portilla et al., 2010; Guzzetti et al., 2012), este hace referencia a los movimientos en masa que tienen una relación con la ocurrencia de algún evento detonante específico (lluvia o sismo). La fecha de ocurrencia del movimiento en masa corresponde a la fecha o periodo de ocurrencia del evento detonante. Incluye también información espacial.

- c. Multitemporales: incluyen información espacio-temporal y la fecha de ocurrencia de los procesos detonados se obtiene a partir de investigación de campo directamente después de su ocurrencia o por interpretación de imágenes de sensores remotos adquiridas de varias épocas consecutivas (Portilla, 2014).

De acuerdo con la escala de trabajo, los recursos disponibles y la importancia de los productos obtenidos a partir de sensores remotos, se recomienda realizar la cartografía de procesos morfodinámicos principalmente a partir de interpretación de imágenes para una posterior revisión de campo (Guzzetti et al., 2012).

Para la aplicación de la presente guía es fundamental la elaboración de inventarios geomorfológicos, los cuales se pueden complementar con inventarios de información secundaria que deben tener un proceso de revisión y validación. Dado que son los que mejor información ofrecen con respecto a la ocurrencia espacial y temporal de los movimientos en masa, es preferible elaborar inventarios multitemporales, aunque este producto está sujeto a la disponibilidad de fuentes de información. Este tipo de inventarios debe contener la información usada para elaborar el mapa (incluyendo información temporal tal como fecha o periodo de las imágenes o del trabajo de campo).

En esta guía se propone incluir dentro del *inventario de procesos morfodinámicos*, tanto los movimientos en masa, como los rasgos o características geomorfológicas indicativas de inestabilidad. En zonas donde se identifiquen evidencias de inestabilidad del terreno asociada con procesos de asentamientos, subsidencia

o comportamientos geotécnicos especiales (por ejemplo expansión o colapso), pueden ser incluidas y representadas en el inventario de procesos morfodinámicos.

### 3.1.2 Contenido del inventario (Atributos)

Con base en las definiciones presentadas y el alcance del producto dentro de la metodología propuesta, a continuación se presentan la información y los requisitos mínimos que debe contener el inventario de procesos morfodinámicos tanto para la elaboración del inventario en sí mismo, como para su uso en los análisis de susceptibilidad y amenaza. Dichos requisitos son:

1. Fuente de información: para la elaboración del inventario de procesos morfodinámicos se deben considerar todas las fuentes de información disponibles, las cuales según su grado de confiabilidad espacio-temporal se pueden dividir en: medios de comunicación y habitantes, información secundaria de entidades públicas y privadas, interpretación de imágenes de sensores remotos y levantamiento en campo. Toda la información se debe agrupar y representar según la fuente de la cual fue obtenida.
2. Representación como polígono: en lo posible todos los movimientos en masa deben ser representados como polígonos; incluso aquellos que se obtengan de información secundaria, medios de comunicación o aquellos que estén registrados como puntos, deberían tener un proceso de conversión a polígonos con el apoyo de imágenes de sensores remotos o durante el levantamiento de campo.
3. Mapeo: es necesario mapear movimientos en masa individuales y no como grupos, esto permite una mejor identificación y relación con factores condicionantes. Con el fin de trabajar con herramientas SIG, los polígonos del inventario deben estar caracterizados con los siguientes atributos para su representación cartográfica:
  - a. Tipo: siguiendo la clasificación presentada en PMA: GCA (2007). En la Tabla 1

- del Anexo 3.1 se presentan algunas características para la clasificación del tipo de movimiento a partir de interpretación de imágenes y levantamiento de campo.
- b. Actividad: se definen dos clases generales para la escala de trabajo: activos e inactivos. Para la definición del estado de la actividad se deben tener en cuenta los criterios presentados en la Tabla 2 del Anexo 3.1, los cuales se pueden aplicar tanto en levantamientos de campo como en interpretación de imágenes independientemente de la fecha de toma de la imagen interpretada. Es importante considerar que de acuerdo con la propuesta de PMA: GCA (2007), dentro de la categoría de movimientos activos se pueden tener reactivados y suspendidos, mientras que en la categoría de movimientos inactivos se tienen estabilizados, latentes, abandonados y relictos. El estado de la actividad se puede relacionar con la edad relativa del movimiento (antiguo o reciente) de acuerdo con los criterios presentados en la Tabla 4 del Anexo 3.1.
  - c. Partes del movimiento en masa: se deben diferenciar en el mapa de inventario de procesos morfodinámicos las partes del movimiento en masa de acuerdo con la propuesta de representación cartográfica que se presenta más adelante.
  - d. Rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad: adicionalmente, en este mapa se deben representar todos los rasgos geomorfológicos de acuerdo con la propuesta de representación cartográfica que se presenta más adelante.
4. Atributos de la base de datos asociada al inventario: para los movimientos en masa se debe diseñar una base de datos asociada con cada polígono, la cual debe contener al menos los atributos presentados en la Tabla 3.4. Estos atributos permitirán, además, utilizar el sistema de información geográfica SIMMA (SGC) para carga y consulta de información. En la Tabla 5 del Anexo 3.1 se presenta la totalidad de los atributos que puede contener el inventario de movimientos en masa para todas las fuentes

de información consultadas. Los campos diligenciados dependerán de la fuente de información de la cual provenga dicho movimiento, siendo la interpretación de imágenes de sensores remotos y el levantamiento de campo las fuentes que aportan mayor información.

### 3.1.3 Fuentes de información

El catálogo e inventario de movimientos en masa se construye mediante la compilación de información proveniente de diferentes fuentes tales como: medios de comunicación y habitantes, información secundaria, interpretación de imágenes de sensores remotos y levantamiento de campo. Cada una de estas fuentes provee información con diferente nivel de detalle y precisión técnica, por lo cual es necesario verificar los requerimientos técnicos mínimos que debe cumplir un dato para ser incluido en el producto final, de acuerdo con los atributos definidos en la Tabla 3.4.

#### 3.1.3.1 Medios de comunicación y habitantes

Cuando ocurre un movimiento en masa en un área específica, por lo general, es la comunidad la primera fuente de información, dado que en muchos casos son los residentes los directamente afectados por estos procesos. Es por esto, que la comunicación directa con miembros de la población local (no experta en movimientos en masa), mediante reuniones o entrevistas, puede brindar información sobre la ocurrencia de movimientos en masa. Sin embargo, en los casos en que no se logra establecer comunicación directa con la comunidad es necesario recurrir a los medios de información social como periódicos, reportes, televisión, radio e incluso redes sociales, entre otros, los cuales se encargan de divulgar la información que la población afectada reporta.

A partir de la información obtenida de este tipo de fuente, se pueden extraer los siguientes atributos: Fecha del proceso (de ocurrencia del movimiento en masa), departamento, municipio, referentes geográficos, vereda y daños producidos por el movimiento.

» **Tabla 3.4.** Atributos mínimos que debe contener el inventario de movimientos en masa

CAMPO	DESCRIPCIÓN
ENCUEST	Nombre(s) de la persona(s) que recopila(n) los datos bien sea en campo, oficina o en ambos.
ID_MOV	Corresponde al identificador principal del movimiento en masa levantado en campo o en la fotointerpretación. Se sugiere que sean dos letras (las iniciales del encuestador) seguidas de tres dígitos numéricos.
COD_SIMMA	Este campo solo será diligenciado si la información del movimiento en masa fue cargada al SIMMA. Corresponde al código asignado por dicho aplicativo al movimiento en masa inventariado.
FECHA_REP	Corresponde a la fecha en que se inventarió el movimiento en masa. No se debe confundir con la fecha de ocurrencia del movimiento en masa.
FECHA_MOV	Fecha de ocurrencia del movimiento en masa. Si no se tiene conocimiento de la fecha de ocurrencia del movimiento en masa, entonces se asignará la fecha de la imagen de sensor remoto más antigua en la cual fue identificado el movimiento. En cualquier otro caso, asignar la misma fecha de reporte.
FTE_INFSEC	Nombre de las imágenes interpretadas o de los estudios a partir de los cuales se levantó el movimiento en masa. Es necesario indicar la fecha de la fuente respectiva. Nota: En algunos estudios técnicos, puede obtenerse directamente la fecha del movimiento en masa. Para algunos estudios técnicos cuyo título sea muy extenso, escribir sólo la cita bibliográfica (autor y año) e incluirla en las referencias del informe escrito.
DPTO	Departamento donde se localiza el movimiento.
PLANCHA	Número de la plancha escala 1:25.000.
MUNICIPIO	Municipio donde se localiza el movimiento.
REF_GEOGRF	Debe indicar algún accidente geográfico cercano o del mismo lugar de ocurrencia del movimiento en masa, que permita establecer su localización.
VEREDA	Vereda en la que se localiza el movimiento.
PARTE	Corresponde a la parte del movimiento identificada. Para el escarpe principal o zona de inicio se utiliza la letra (e) y para la zona de depósito o cuerpo del movimiento la letra (d). En el caso en que no se pueda identificar ninguna de las partes del movimiento se utiliza la letra (n).
ID_PARTE	Corresponde al identificador del polígono de cada una de las partes que conforman el movimiento en masa (escarpe y cuerpo). Se propone numerarlas en forma consecutiva. Ejemplo: el movimiento con ID_MOV JC001 en el cual se han identificado dos escarpes y un cuerpo, está conformado por tres polígonos identificados como JC001-1, JC001-2 y JC001-3.
ETIQUETA	Letras que indican el tipo y subtipo de movimiento en masa de acuerdo con la Tabla 3.6. Este puede ser acompañado de una letra que identifique la parte del movimiento en masa.
ESTE_ESC	Coordenada Este (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono correspondiente al escarpe del movimiento en masa (no aplica para avenidas torrenciales y reptación).
NORTE_ESC	Coordenada Norte (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono correspondiente al escarpe del movimiento en masa (no aplica para avenidas torrenciales y reptación).
ESTE_CUERP	Coordenada Este (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono que corresponde al cuerpo del movimiento (zona de depósito).
NORT_CUERP	Coordenada Norte (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono que corresponde al cuerpo del movimiento (zona de depósito).
ESTE	Coordenada Este del centroide del movimiento (Magna Sirgas origen Bogotá). Este campo se diligencia en el caso que no sea posible diferenciar las partes de un movimiento en masa.
NORTE	Coordenada Norte del centroide del movimiento (Magna Sirgas origen Bogotá). Este campo se diligencia en el caso que no sea posible diferenciar las partes de un movimiento en masa.
ALTITUD	Valor de altitud del movimiento en metros sobre el nivel del mar (msnm).
TIPO_MOV1	Tipo del primer movimiento en masa (caída, volcamiento, deslizamiento traslacional y rotacional, propagación lateral, reptación, flujo, deformaciones gravitacionales y sin clasificar).
TIPO_MOV2	Esta casilla se diligencia en el caso en que se identifique más de un tipo de mecanismo en el mismo movimiento.
SUBTIPO_1	Subtipo de movimiento en masa de acuerdo al PMA: GCA, 2007.
SUBTIPO_2	Esta casilla se diligencia en el caso en que se identifique más de un subtipo de mecanismo en el mismo movimiento.

(…/…)

(.../...)

CAMPO	DESCRIPCIÓN
ACTIVIDAD	Define si el movimiento se encuentra activo o inactivo.
AREA_MOV	Área del movimiento en masa en m <sup>2</sup> . En el caso de movimientos tipo caída, se registra el área del cuerpo (zona de depósito), para los demás tipos de movimientos se registra el área total del polígono (escarpe + cuerpo).
ELEM_EXP	Identificar el tipo de elemento afectado por la ocurrencia del movimiento en masa, empleando los términos definidos en el ítem "tipo de daños" del formato de inventario.

Fuente: autores.

Este tipo de información tiene en algunos casos una validez técnica limitada, que sin embargo permite alimentar el catálogo histórico de movimientos en masa y constituir una referencia de sitios con evidencias de inestabilidad que podrían ser sometidos a verificación mediante otras fuentes de información como interpretación de sensores remotos y levantamiento de campo para eventualmente incluirse dentro del inventario de procesos morfodinámicos.

Es importante tener en cuenta que la información obtenida de este tipo de fuente deberá ser compilada y revisada por profesionales expertos en movimientos en masa con el fin de verificar su veracidad y completitud, para determinar su utilidad.

### 3.1.3.2 Información secundaria de entidades públicas y privadas

Existen entidades estatales del orden nacional, regional y local, así como las organizaciones que forman parte del Comité Nacional para el Manejo de Desastres, que dentro del ejercicio de sus funciones elaboran reportes, informes y mapas en los cuales han recopilado información sobre la ocurrencia de movimientos en masa en diferentes áreas del territorio colombiano. También se incluyen dentro de este tipo de fuentes de información los informes, bases de datos e inventarios relacionados con movimientos en masa, elaborados por empresas consultoras, universidades e instituciones privadas durante la ejecución de sus proyectos, información que debe ser solicitada para la zonificación del área de estudio. A nivel nacional también se pueden encontrar diferentes bases de datos, algunas de libre acceso en la web y otras a las cuales se puede tener acceso mediante solicitud formal, estas contienen información específica de movi-

mientos en masa en diferentes regiones del país (Tabla 3.5).

Con respecto a los atributos que pueden extraerse de la información obtenida a partir de este tipo de fuente, es importante mencionar que estos pueden variar debido a que cada entidad tiene sus propios métodos y sistemas para la adquisición y tratamiento de la información. Sin embargo, se puede considerar que los principales atributos que este tipo de información brinda son: fecha de reporte, fecha del evento (fecha en la que ocurrió el movimiento en masa), fuente, años de las fotografías, departamento, ciudad, referentes geográficos, vereda, cuenca, importancia, coordenadas del movimiento (este, norte y altura en msnm, ya sea del escarpe principal del cuerpo o del pie del movimiento), tipo de movimiento, los efectos y/o daños sobre el territorio y observaciones sobre el movimiento.

Se recomienda que esta información sea revisada, analizada y validada por profesionales expertos en movimientos en masa, mediante la interpretación de imágenes de sensores remotos, para evaluar la posibilidad de ser representados cartográficamente teniendo en cuenta los lineamientos propuestos más adelante.

### 3.1.3.3 Interpretación de imágenes de sensores remotos

De la interpretación de imágenes de sensores remotos se obtiene información valiosa, principalmente para aquellas zonas cuyas condiciones de accesibilidad dificultan el levantamiento del inventario en campo. Es así como este tipo de recursos constituyen la principal fuente de información del inventario de procesos morfodinámicos.

De acuerdo con van Westen (2013):

» **Tabla 3.5.** Información secundaria que se puede recopilar de diferentes entidades públicas y privadas

TIPO DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	ENTIDADES
Geología y Geomorfología Regional y Local	SGC, CAR´ s, IDEAM, IGAC, Universidades Públicas y Privadas, Empresas Consultoras
Bases de datos e Inventarios de Movimientos en Masa	SIMMA (Base de datos del SGC), DESINVENTAR (Base de datos), INVIAS, CAR´ s, Planeación Municipal y Departamental, UNGRD, CAR´ s, Empresas consultoras
Informes y Mapas de Movimientos en Masa	SGC, CAR´ s, Universidades Públicas y Privadas, Planeación Municipal y Departamental, Empresas Consultoras
Reportes de emergencias por Movimientos en Masa	UNGRD, SGC, INVIAS, Defensa Civil, Cuerpo de Bomberos, Ejército Nacional, Policía Nacional, CMGRD

Fuente: autores.

La interpretación de imágenes de sensores remotos es un proceso empírico y subjetivo, se trata de un arte más que una ciencia y requiere de profesionales debidamente capacitados y experimentados.

La interpretación de imágenes se basa en: la experiencia del intérprete, las imágenes disponibles y la calidad y detalle de las mismas, el tamaño del área de análisis y los procedimientos y criterios utilizados en el proceso de interpretación (van Westen, 2013). Los criterios para la interpretación de movimientos en masa, a partir de imágenes de sensores remotos, se resumen en la Tabla 1 del Anexo 3.1, con base en las propuestas de Dikau et al. (1996), Naranjo (2015), Suárez (1998) y van Westen (2013).

Las fuentes de información para interpretación de imágenes de sensores remotos pueden ser análogas o digitales, entre las cuales se pueden mencionar: fotografías aéreas, imágenes de satélite de alta resolución, mapas de sombras derivados de modelos digitales de elevación, imágenes de radar y modelos tridimensionales del terreno generados a partir de información LiDAR (Figura 3.1). Cada una de estas fuentes presenta diferentes niveles de detalle, en los que la resolución puede variar desde metros hasta centímetros sobre la superficie del terreno y de igual manera las escalas de trabajo en el caso de las fotografías aéreas. En este sentido, es recomendable que para la identificación y caracterización de movimientos en masa mediante la interpretación de imágenes, se utilicen los insumos con mayor nivel de detalle que se tengan

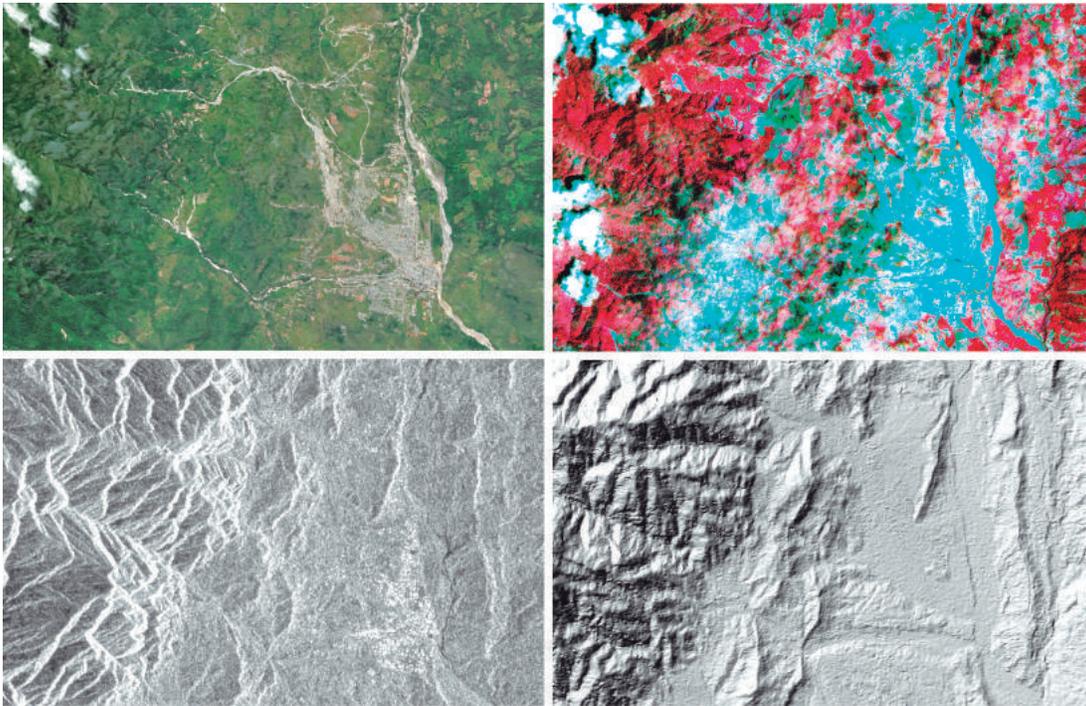
disponibles. Igualmente, en los últimos años ha sido de gran utilidad el uso de las imágenes disponibles en el programa Google Earth® para la elaboración de inventarios de movimientos en masa.

De la interpretación de imágenes de sensores remotos se pueden extraer todos los atributos de movimientos en masa presentados en la Tabla 5 del Anexo 3.1, a excepción del espesor de la masa desplazada por el movimiento, pues se considera que dicho atributos solo se puede validar a partir de levantamiento de campo.

### 3.1.3.4 Levantamiento en campo

Esta es la fuente que permite recopilar, con el mayor nivel de detalle, la información para caracterizar un movimiento en masa. Se recomienda que este trabajo de campo sea llevado a cabo por profesionales expertos en identificación y caracterización de movimientos en masa. Para efectuar el levantamiento de campo del inventario de movimientos en masa, se recomienda utilizar el formato modificado de inventario presentado en SGC & UNAL (2015a, disponible para descarga en el link <http://simma.sgc.gov.co>). Los conceptos y lineamientos para el diligenciamiento de dicho formato se encuentran explicados en el documento *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas* elaborado por PMA: GCA (2007).

Los criterios para identificación de los diferentes tipos de movimientos en masa y estado de la actividad, presentados en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 4 del Anexo 3.1, son también aplicables para el levantamiento de campo.



» **Figura 3.1.** Ejemplos de algunas imágenes de sensores remotos del casco urbano de Mocoa, Putumayo

Arriba izquierda: ortofotomosaico (Fuente: CORPOAMAZONIA); Arriba derecha: imagen satelital Sentinel 2A con combinación de bandas (Fuente: Alaska Satellite Facility); Abajo izquierda: imagen de radar sensor Sentinel 1B (Fuente: Alaska Satellite Facility); Abajo derecha: Modelo de sombras a partir de DEM GeoSAR de resolución espacial 5 m (Fuente: IGAC).

La información recopilada mediante el levantamiento en campo permite la extracción de todos los atributos presentados en la Tabla 5 del Anexo 3.1.

### 3.1.4 Representación cartográfica

De acuerdo con el PMA: GCA (2007):

La cartografía de amenazas naturales tiene como propósito principal presentar la información relacionada con diferentes eventos amenazantes para un área dada en un solo mapa, ofreciendo así una representación comprensiva de los procesos naturales con sus diferentes características, como magnitud, frecuencia y área de impacto.

A continuación, se propone un sistema de representación cartográfica para la elaboración del mapa de inventario de procesos morfodinámicos, de acuerdo con las tipologías utilizadas y

las descripciones dadas en el PMA: GCA (2007). Es importante mencionar que en esta propuesta metodológica se hacen algunas adaptaciones con el propósito de facilitar su lectura. Además, se busca establecer un lenguaje común, de fácil comprensión y técnicamente sustentado, tomando siempre como punto de partida la posibilidad de representación a la escala de trabajo.

Para la representación de los procesos se propone simplificar las partes del movimiento en masa en escarpe principal o zona de inicio (e) y la zona de depósito o cuerpo del movimiento (d). Además, en movimientos en masa tipo deslizamiento se pueden indicar áreas con evidencias (proclives) a ser afectadas (ace) por inestabilidad del terreno, estas zonas se incluyen con base en la distribución del movimiento y el análisis geomorfológico del experto. Las zonas de tránsito de algunos tipos de procesos como flujos o caídas también se pueden indicar gráficamente (Figura 3.2 y Figura 3.3). Estas partes se definen como:



» **Figura 3.2.** Partes de los movimientos en masa tipo deslizamiento: escarpe o zona de inicio (e), cuerpo o zona de depósito (d) y área proclive a ser afectada (ace)

Fuente: autores.



----- Zona de depósito      ----- Zona de tránsito

» **Figura 3.3.** a) Partes de los movimientos en masa tipo flujo: escarpe (e) y cuerpo (d); b) Partes de un flujo clasificado como avenida torrencial: zona de tránsito (t) y zona de depósito (d)

Fuente: autores.

**Escarpe principal (e):** corresponde a la parte superior vertical o semivertical del plano de falla que queda expuesta en superficie por el movimiento ladera abajo del cuerpo principal (PMA: GCA, 2007).

**Zona de tránsito (t):** es uno de los componentes de la trayectoria de un movimiento en masa y corresponde al área donde se observan las huellas de la propagación del material desplazado, esta zona aplica a los flujos clasificados como avenida torrencial (Adaptado de PMA: GCA, 2007).

**Cuerpo del movimiento (zona de depósito) (d):** parte del material desplazado que yace sobre la superficie de falla (PMA: GCA, 2007).

**Áreas proclives a ser afectadas (ace):** zonas donde se encuentran evidencias que permiten inferir que ante la eventual evolución del proceso, el material continuará desplazándose.

#### 3.1.4.1 Simbología

El objetivo es diferenciar mediante símbolos o colores algunos atributos mínimos que deben quedar representados, con el fin de brindar la

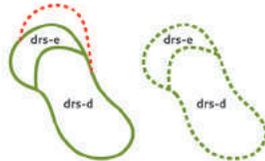
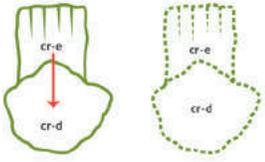
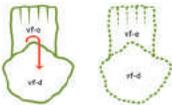
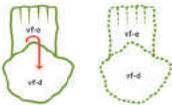
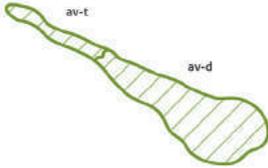
mayor información posible. En la Tabla 3.6 se presenta la simbología propuesta para la elaboración del mapa de inventario de procesos morfodinámicos y en la Figura 3.4 se presenta un esquema de la aplicación de esta propuesta, en la que se observan además de los atributos de los movimientos en masa, la fuente de información y si hubo o no verificación en campo.

Considerando que en el inventario se incluyen rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad, en la Figura 3.5 se propone la simbología para representar los diferentes rasgos relacionados con procesos erosivos, coronas, cicatrices, grietas, entre otros.

El manejo de datos e información en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) determina para cada movimiento en masa, la representación por medio de un polígono con un código junto con sus atributos, los cuales se manejan en capas de información para su representación. En el caso de que no se puedan representar como polígono, los movimientos en masa se pueden representar como puntos en los que se busca diferenciar al menos el tipo de movimiento y la actividad como se presenta a manera de ejemplo en la Figura 3.6.

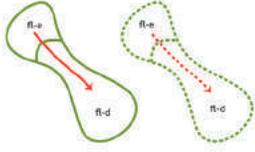


» **Tabla 3.6.** Representación cartográfica y simbología de algunos atributos para los diferentes tipos de movimientos en masa

TIPO	SUBTIPO	PROFUNDIDAD	ACRÓNIMO	IDENTIFICADOR PARTES DEL MOVIMIENTO		ACTIVIDAD		OBSERVACIONES
				ESCARPE (Zona de inicio)	CUERPO (Zona de depósito)	ACTIVO	INACTIVO	
	Rotacional		drs/drp	drs-e/ drp-e	drs-d/ drp-d			
Deslizamiento	Traslacional	Superficial/ Profundo	dts/dtp	dts-e/ dtp-e	dts-d/ dtp-d			En el caso de deslizamientos activos, se puede indicar el área proclive a ser afectada (ace) o área con evidencias que permiten inferir que el material podría continuar desplazándose, representada en la figura como una línea punteada.
	Roca	NA	cr	cr-e	cr-d			
Caídas	Suelo	NA	cs	cs-e	cs-d			La dirección de viaje del material desprendido se puede indicar mediante flechas que van desde el escarpe hacia la zona de depósito.
	Bloque	NA	vb	vb-e	vb-d			
	Flexural	NA	vf	vf-e	vf-d			
Volcamiento	Flexural macizo rocoso	NA	vfm	vfm-e	vfm-d			
Flujos	Avenidas Torrenciales	NA	av	NA	av			En estos procesos se debe representar tanto la zona de tránsito (av-t) como la zona de depósito. En el caso en que se identifique más de un proceso (multitemporal), se puede diferenciar con simbología de colores.

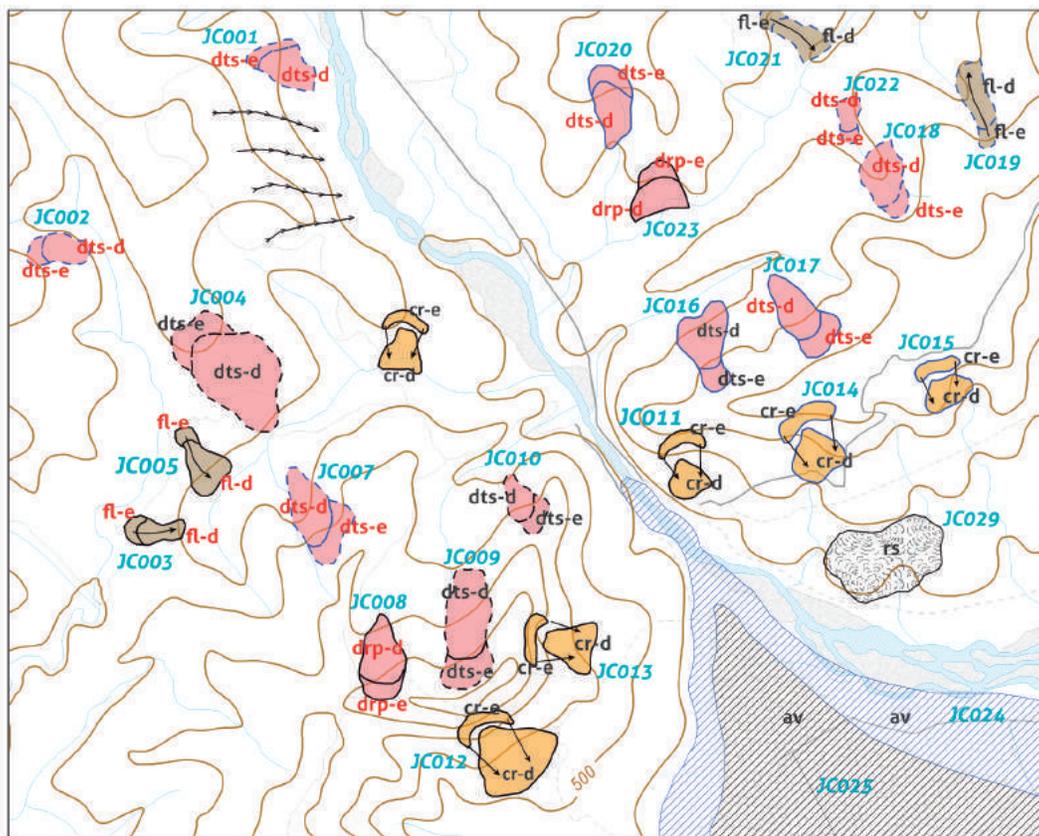
(.../...)

(.../...)

TIPO	SUBTIPO	PROFUNDIDAD	ACRÓNIMO	IDENTIFICADOR PARTES DEL MOVIMIENTO		ACTIVIDAD		OBSERVACIONES
				ESCARPE (Zona de inicio)	CUERPO (Zona de depósito)	ACTIVO	INACTIVO	
Flujos	Flujo de lodo	NA	fl	fl-e	fl-d		La trayectoria de este tipo de procesos se puede indicar mediante una flecha que va desde el escarpe hacia la zona de depósito.	
	Flujo de tierra	NA	ft	ft-e	ft-d			
	Flujo de detritos	NA	fd	fd-e	fd-d			
	Deslizamiento por flujo	NA	df	df-e	df-d			
Reptación	NA	Superficial/ Profunda	rs/rp	NA	rs/rp		En este proceso se debe representar la zona afectada.	

Fuente: autores.





ESCALA 1:25.000



CONVENCIONES

TIPO	ACTIVIDAD	PARTE DEL MOVIMIENTO
Caída	Activo	Escarpe: e
Deslizamiento	Inactivo	Cuerpo: d
Flujo	FUENTE	VERIFICADO EN CAMPO
Reptación	Fotografía aérea 1990	Sí
Avenidas torrenciales	Fotografía aérea 2010	No
RASGOS GEOMORFOLÓGICOS	EJEMPLO	
Cárcava	<b>JC008</b>	Escarpe de deslizamiento rotacional profundo, inactivo, interpretado en fotografía aérea de 1990, no verificado en campo.

» **Figura 3.4.** Ejemplo de aplicación de la propuesta de representación cartográfica y simbología para el mapa de inventario de procesos morfordinámicos

Fuente: autores.

RASGOS GEOMORFOLÓGICOS	SÍMBOLO	RASGOS GEOMORFOLÓGICOS	SÍMBOLO
Escape menor movimiento en masa		Escarpe caída de rocas	
Erosión en surcos		Terracetos o caminos de ganado	
Erosión tipo cárcavas		Grietas longitudinales, transversales o radiales	
Hondonadas o tierras malas		Escarpe geomorfológico	
Cicatriz o corona de deslizamiento antiguo		Cicatriz o corona de deslizamiento reciente	
Socavación fluvial lateral		Cono de detritos	
Cantera activa		Cantera inactiva	
Escarpe mayor movimiento en masa			

» **Figura 3.5.** Simbología para la representación de rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad

Fuente: tomado de Verstappen & van Zuidam (1992); PMA: GCA (2007) y elaboración propia.

TIPO DE MOVIMIENTO EN MASA	ACTIVIDAD	REPRESENTACIÓN TIPO PUNTO
Deslizamientos	Activo	
	Inactivo	
Flujos	Activo	
	Inactivo	
Caídas	Activo	
	Inactivo	

» **Figura 3.6.** Ejemplo de representación cartográfica tipo punto para los movimientos en masa y su estado de la actividad

Fuente: tomado y adaptado de PMA: GCA (2007).

### 3.1.5 Consideraciones finales

Con respecto a la elaboración del mapa de inventario de procesos morfodinámicos es importante hacer algunas consideraciones:

- » De acuerdo con el PMA: GCA (2007), el término enjambre (landslides swarm) se refiere a eventos en los cuales numerosos movimientos en masa individuales ocurren al mismo tiempo en varias laderas de una misma zona y posiblemente fueron causados por un mismo evento detonante. En este tipo de eventos es difícil identificar como principal a un solo movimiento en masa, por lo que se propone mapear toda el área afectada como un solo polígono involucrando tanto las zonas de inicio como las de depósito. Es necesario identificar un mecanismo principal y asignarlo como atributo a dicho polígono, sin embargo, en el mapa final estas áreas deben ser diferenciadas de los movimientos en masa individuales.
- » Para el caso en el que dentro de un movimiento en masa se puedan identificar más de un escarpe o más de un cuerpo, estos se deben diferenciar en el mapa final. En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo para este caso: se presentan movimientos tipo flujo de lodo (fl), en la mayoría de los cuales se ha cartografiado el escarpe o zona de inicio (fl-e) y el cuerpo o zona de depósito (fl-d) a excepción de los movimientos JC003 y JC004 en cuyo caso a la escala de trabajo no es posible diferenciar claramente sus partes. Se puede observar que el movimiento JC005 presenta dos zonas de inicio (fl-e), las cuales han depositado material en una misma área dando lugar a un solo cuerpo fl-d para dicho movimiento. No obstante, se puede dar el caso contrario, en el que un movimiento en masa presente un único escarpe pero dos zonas de depósito diferenciables que pertenecen al mismo movimiento. En este ejemplo, también se muestra el caso en el que el material de cada uno de estos movimientos cae a un área común a todos ellos (una corriente de agua por ejemplo), funcionando como una zona de tránsito de un flujo clasificado como avenida to-  
rrencial; para este proceso se diferencian dos partes: la zona de tránsito (av-t) y la zona de depósito (av-d).
- » En el inventario de procesos morfodinámicos pueden incluirse los depósitos de flujos y zonas de tránsito obtenidas tanto del trabajo de campo como a partir del mapa de subunidades geomorfológicas, al igual que posibles zonas de aporte de sedimentos, como el material localizado junto a los cauces que eventualmente puede ser arrastrado aguas abajo por la “creciente” y depositado en áreas topográficamente más bajas generalmente formando un abanico (UNAL, 2009). Es recomendable diferenciar la temporalidad y número de estos procesos en el caso en que se incluyan en el mapa de inventario.
- » En el caso en que se tengan movimientos en masa representados como punto, éstos pueden incluirse en el mapa de inventario, con una simbología que permita la visualización de los atributos descritos anteriormente. De la misma forma que con los polígonos, estos puntos deben asociados unos atributos mínimos (Tabla 3.4). Estos puntos también se deberían diferenciar como ubicados en el escarpe o en el cuerpo del movimiento. En el caso en que no sea posible diferenciar el escarpe del depósito, se puede representar solo con un punto.
- » Si se identifican reactivaciones de movimientos en masa en fuentes de información de varias épocas, se pueden representar como polígonos diferentes que permitan establecer una tendencia de la evolución de estos procesos, naturalmente considerando una adecuada visualización en el mapa final.
- » Aquellos movimientos en masa identificados cuya clasificación no sea confiable por falta de validación de campo, o aquellos cuyas partes no sean diferenciables, se pueden representar como un solo polígono que incluya tanto la zona de escarpe como la de depósito. Estos casos deben ser claramente diferenciados en el mapa final.
- » Se propone la representación del estado de la actividad (activo, inactivo) en el mapa final de inventario de procesos morfodinámicos como un atributo principal para el análisis



## CONVENCIONES

TIPO DE MOVIMIENTO	PARTE DEL MOVIMIENTO
 Avenida torrencial	e: escarpe (zona de inicio)
 Flujo de lodo	d: cuerpo (zona de depósito) t: zona de tránsito

» **Figura 3.7.** Ejemplo de la diferenciación de las partes de movimientos en masa tipo flujo

Fuente: ortofotomosaico cortesía de CORPOAMAZONIA.

de amenaza, sin embargo, si se considera relevante por las características propias de la zona de estudio, se puede usar simbología adicional para la representación de otros atributos relacionados con la actividad como son el estilo (complejo, compuesto, múltiple, entre otros) y la distribución (retrogresivo, ensanchado, entre otros).

» Aunque se debe procurar el levantamiento de todos los atributos para cada movimiento en masa, cuando no sea posible la obtención de la información completa por aspectos como accesibilidad o unidad mínima de mapeo, se deben diligenciar los atributos mínimos de la Tabla 3.4. En el caso en que el movimiento en masa esté afectando o pueda afectar algún

tipo de elemento (infraestructura, personas, medio ambiente), es necesario el levantamiento de los atributos completos presentados en la Tabla 5 del Anexo 3.1.

- » Es importante reconocer que los inventarios geomorfológicos basados en eventos y multitemporales dependen de la disponibilidad de recursos y técnicas que en Colombia pueden ser bastante limitadas. Sin embargo, con el fin de promover y resaltar la importancia en la obtención sistemática de este tipo de información, se propone en esta guía su elaboración a partir de información de al menos tres épocas diferentes. Estas pueden corresponder a imágenes previas y posteriores a posibles eventos detonantes de movimientos en masa. Portilla (2014) presenta una metodología para la comparación de eventos de lluvia y análisis multitemporal de movimientos en masa para este tipo de análisis.

## 3.2 FACTORES CONDICIONANTES

### 3.2.1 Geomorfología

En la zonificación de amenazas por movimientos en masa, la geomorfología constituye el factor más importante para el análisis de la evolución del territorio y su relación con la ocurrencia de procesos con características definidas. Existen incluso metodologías de zonificación basadas en el mapeo directo de unidades geomorfológicas, en las que la amenaza es determinada directamente por expertos en el tema o por combinaciones cualitativas con otras temáticas relacionadas (van Westen et al., 2003).

Dado que la cartografía geomorfológica registra información de las formas del terreno, los materiales que las constituyen y los procesos superficiales que los afectan (Carvajal, 2012), en la ejecución de estudios de amenaza por movimientos en masa es obligatoria la elaboración de estos mapas tanto para los análisis de amenaza como para su validación e incorporación en la planificación territorial.

Con el fin de aplicar la metodología de zonificación, se ha propuesto obtener de la carto-

grafía geomorfológica datos relacionados con la morfometría y morfología del terreno, así como con la morfodinámica y morfogénesis, los cuales son considerados en una u otra etapa de la metodología. Estos datos son representados como capas de información con cubrimiento en toda el área de estudio. Como se mencionó anteriormente, la importancia de cada factor considerado radica en el conocimiento del área de estudio, las particularidades de cada zona y la disponibilidad de información, por lo que los datos aquí propuestos pueden ser complementados a consideración de los expertos a cargo de la ejecución del estudio.

De acuerdo con los lineamientos para cartografía geomorfológica del SGC para la elaboración de mapas geomorfológicos (Carvajal, 2012; SGC, 2012), a escala 1:25.000, deben obtenerse Mapas de Subunidades Geomorfológicas (SGMF). Tomando como base la información contenida en este tipo de mapas, para zonificación de amenaza por movimientos en masa se propone generar capas de información de la pendiente del terreno, curvatura, morfogénesis (subunidades geomorfológicas indicativas de procesos tipo caída y flujo) y rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad. La componente morfodinámica está relacionada con procesos tipo erosión (superficial y fluvial) y movimientos en masa, que son la base para la elaboración del mapa de inventario de procesos morfodinámicos descrito anteriormente.

#### 3.2.1.1 Mapa de subunidades geomorfológicas

La representación cartográfica de la geomorfología propia de una región tiene como objetivo fundamental constituir un registro de información de cada una de las formas del terreno identificadas a una escala específica de trabajo, considerando los materiales y estructuras geológicas que las conforman e integrando además el análisis de los procesos superficiales que actúan sobre estas a través del tiempo, de tal forma que se logre entender la historia evolutiva del paisaje de un área específica. La información obtenida a partir de la cartografía geomorfológica es importante para el manejo ambiental y territorial de una región, debido a que expresa los cambios

geológicos más recientes, que son el resultado de los procesos tanto endógenos como exógenos (Carvajal, 2012).

El análisis geomorfológico de una región permite identificar zonas con características homogéneas que facilitan el tratamiento de la información mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG). Por lo tanto, un mapa geomorfológico funciona como un documento que integra aspectos morfogenéticos, morfológicos, morfométricos y morfodinámicos, que ayudan a entender el origen y los principales procesos que han modelado el paisaje. En este sentido, Carvajal (2012) plantea que la cartografía y el análisis geomorfológico tienen aplicación en la evaluación ambiental, ordenamiento territorial, planificación del uso del territorio y la política del manejo de amenazas y riesgos geológicos.

Un mapa de SGMF aplicado a la zonificación de amenaza por movimientos en masa, corresponde a la representación cartográfica de todas las formas del relieve de una región, definidas estas por la expresión morfológica y morfométrica del terreno, su relación con los cambios litológicos o sedimentológicos de las formaciones superficiales (rocas y suelos) y su disposición estructural (Carvajal, 2012), al igual que los procesos morfodinámicos (movimientos en masa y procesos erosivos), de carácter activo e inactivo que han modelado la superficie de un territorio. Se trata de una interpretación subjetiva del paisaje geomorfológico pero debe ser fácilmente referenciable sobre el terreno (Garzón, 1978, citado por Peña, 1997).

De acuerdo con Carvajal (2008) a la escala 1:25.000 las subunidades geomorfológicas representan implícitamente aspectos relacionados con la morfometría, la morfología, la disposición estructural y contrastes de los materiales así como los procesos morfodinámicos actuales que los afectan, lo cual en comparación con el alcance que tienen las unidades geomorfológicas (definidas por aspectos morfogenéticos, morfológicos y geométricos), resulta en un incremento del detalle tanto en la representación cartográfica de las geoformas como en la interpretación de la dinámica de los procesos y la evolución geomorfológica propia de un área en particular a dicha escala de trabajo.

A continuación se presentan definiciones sobre los tres componentes básicos de un mapa de subunidades geomorfológicas como marco de referencia para su elaboración y aplicación en análisis de amenaza por movimientos en masa: morfología, morfometría y morfodinámica.

### Morfología

Está relacionada con los aspectos de la geometría del relieve e incluye fundamentalmente los gradientes topográficos y las formas relativas del mismo, descritos mediante adjetivos descriptivos y representativos (SGC, 2012). La morfología del relieve se debe a los procesos geomorfológicos endógenos o exógenos mayores, tales como: plegamiento, vulcanismo, denudación, sedimentación fluvial torrencial, sedimentación-erosión simultánea y sedimentación fluvial tranquila por desbordamiento lateral o sedimentación fluvial por diseminación, entre otros (Villota, 1997).

El análisis morfológico del relieve incluye la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales de una forma determinada del terreno. De acuerdo con SGC (2012), dicha comparación se puede expresar en términos de: contraste del relieve (diferencia de altitud de la geoforma entre la parte más alta y más baja de la misma), inclinación y longitud de la ladera, forma de la ladera (recta, cóncava, convexa, irregular, compleja), patrón de drenaje y forma de crestas y valles. La descripción y análisis de cada uno de estos elementos morfológicos mencionados se puede realizar considerando los lineamientos propuestos por SGC (2012).

### Morfometría

La morfometría se dedica al análisis cuantitativo de la superficie del terreno en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente, con dos orientaciones o enfoques: una morfometría específica que analiza los rasgos discretos de la superficie del terreno (p.ej. las formas de terreno) y una morfometría general que trata de los rasgos continuos. En su estado actual, la morfometría consiste esencialmente en la caracterización y el análisis digital de superficies topográficas continuas (Pike et al., 2009, citado por Zinck, 2012). Para tal fin, los DEM han surgido como una herramienta que permite la medición y extracción

de atributos que describen los rasgos topográficos del paisaje (Gallant & Wilson, 2000; Hutchinson & Gallant, 2000; Olaya, 2009, citados por Zinck, 2012). Los parámetros más frecuentemente medidos incluyen: altitud (altura sobre el nivel del mar), pendiente, dirección, curvatura y rugosidad del relieve, entre otros. La distribución espacial de estos parámetros permite inferir la variabilidad de procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos en el paisaje. De acuerdo con Verstappen & van Zuidam (1992), la pendiente del terreno (medida en ángulos) es el mejor indicador para realizar subdivisiones del relieve y es conveniente representar estos datos como un mapa de pendientes por separado.

### Morfodinámica

Estudia los procesos superficiales que afectan a una geoforma y que han ocurrido tanto en el pasado, como los que se encuentran activos en el presente o aquellos que se puedan activar en el futuro (INGEOMINAS, 2004a). Se refiere a la dinámica exógena relacionada con la actividad de agentes como el viento, agua, hielo y la acción de la gravedad terrestre, que modifica las geoformas preexistentes. Estos agentes, específicos para cada ambiente morfogenético, afectan y modelan la superficie terrestre con diferentes grados de intensidad, imprimiéndole al terreno características propias de cada ambiente (SGC, 2012).

La morfodinámica como se aplica en esta guía permite identificar y definir la evolución de los procesos denudacionales (procesos erosivos y movimientos en masa) que han ocurrido en un área determinada (cuena), particularmente en términos de estabilidad del terreno. Así mismo, el tipo de proceso y su intensidad, que contribuyen de manera importante en la evolución del paisaje. La morfodinámica permite explicar y clasificar los diferentes movimientos en masa que ocurren, han ocurrido o pueden ocurrir en el territorio, bajo unas condiciones naturales específicas.

#### 3.2.1.1.1 Elaboración del mapa de subunidades geomorfológicas

Para la elaboración de mapas de subunidades geomorfológicas se consideran tres etapas básicas propuestas en INGEOMINAS (2004a): fase

preliminar de oficina, fase de campo y fase final de oficina.

La fase de oficina puede dividirse en dos etapas: recopilación y análisis de información temática y proceso de fotointerpretación. La primera requiere contar con insumos básicos e información temática, secundaria o primaria, que ayuden a definir en forma adecuada el marco geológico y geomorfológico regional. Temáticamente se requiere de toda la información de geología y geomorfología a escalas regional (1:100.000), semidetallada y detallada (1:25.000 y 10.000); estudios de suelos (geotécnicos y edáficos), uso del suelo y cobertura de la tierra, hidrogeológicos y ambientales, entre otros. De acuerdo con el objetivo y alcance de la temática, los insumos recopilados deben cumplir con los requerimientos mínimos cartográficos que faciliten operaciones SIG entre ellos. Además se debe contar con la información referente a movimientos en masa. Esta etapa permite definir el contexto geológico-geomorfológico regional, el cual será complementado con la interpretación de imágenes de sensores remotos. La segunda etapa de la fase de oficina corresponde al proceso de fotointerpretación, el cual está dirigido a delimitar las subunidades geomorfológicas, haciendo especial énfasis en la interpretación de procesos morfodinámicos (como movimientos en masa, procesos erosivos y rasgos geomorfológicos), siempre tomando en cuenta principios básicos de fotointerpretación y criterio experto. El resultado de esta fase es la generación de dos mapas a nivel preliminar: el mapa de SGMF y el mapa de inventario de procesos morfodinámicos, a partir de los cuales se planea el proceso de validación en campo.

La fase de campo se llevará a cabo de manera sistemática, enfocada en la identificación y caracterización final de las SGMF, de los procesos erosivos y movimientos en masa. Constituye un complemento y validación para los mapas obtenidos de la fase preliminar de oficina.

La fase final de oficina consiste en la evaluación de la información obtenida y elaboración y digitalización de los mapas de subunidades geomorfológicas definitivos.

Las técnicas y conceptos para la elaboración de mapas de subunidades geomorfológicas



pueden ser consultados en detalle en INGEOMINAS (2004a), SGC (2012) y Carvajal (2012).

### 3.2.1.2 Geomorfología para la zonificación de amenazas por movimientos en masa

De acuerdo con la información contenida en los mapas de subunidades geomorfológicas, para zonificación de amenaza por movimientos en masa, se propone generar las siguientes capas de información (variables):

1. Pendiente del terreno
2. Curvatura (componente plano)
3. Subunidades indicativas de procesos tipo caída o flujo
4. Rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad

Como se mencionó, los procesos relacionados con movimientos en masa y erosión son considerados en el mapa de inventario de procesos morfodinámicos.

A continuación se definen cada una de las capas propuestas.

#### 3.2.1.2.1 Pendiente del terreno

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyo valor se expresa en grados de 0 a 90. La pendiente se puede considerar como un factor importante en la ocurrencia de movimientos en masa en la medida en que se relaciona directamente con las tensiones de corte tangenciales y normales en los materiales superficiales, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Santacana, 2001). La pendiente es el principal factor geométrico a tener en cuenta en análisis de estabilidad y puede obtenerse como una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM.

Los rangos de pendiente presentados en la Tabla 3.7 pueden ser aplicados a la capa de información que será utilizada en el proceso de zonificación, sin embargo, es importante tener en cuenta que la categorización de los rangos de pendiente del terreno está condicionada por las características morfométricas, morfológicas y morfodinámicas propias del área de estudio, por lo tanto, el conocimiento del área de estudio y el criterio experto serán claves para su definición.

» **Tabla 3.7.** Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa

INCLINACIÓN (°)	PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0-2	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable.
2-4	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluji3n) y fluviales (erosi3n laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4-8	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8-16	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluji3n periglacial, reptaci3n y ocasionalmente deslizamientos, tambi3n erosi3n de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosi3n y deslizamientos.
16-35	Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosi3n bajo cubierta forestal, reptaci3n, deslizamientos). Alta propensi3n al desarrollo de procesos erosivos.
35-55	Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, dep3sitos granulares ca3ticos de poco espesor.
> 55	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudaci3n de escarpe"; susceptible a rodamiento de rocas.

Fuente: tomado de van Zuidam (1986).

### 3.2.1.2.2 Curvatura

La curvatura indica la forma de las laderas. Puede obtenerse como una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM y permite determinar el grado de Concavidad/Convexidad mediante el radio de curvatura de una celda según un plano vertical. Un valor positivo indica que la superficie es lateralmente convexa hacia la celda. Un valor negativo indica que la superficie es lateralmente cóncava hacia la celda. Un valor alrededor de cero indica que la superficie es lineal (Figura 3.8).

En la generación del modelo de curvatura se incluyen dos componentes: las curvaturas que son paralelas a la dirección de máxima pendiente y que se pueden asociar a la aceleración y desaceleración de las corrientes por la superficie (curvatura de perfil), y las curvaturas que son perpendiculares a la dirección de máxima pendiente y que se pueden asociar con la convergencia y divergencia de la corriente por la superficie (curvatura de plano).

En este documento se propone el uso de la curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente (curvatura de plano).

La variable se relaciona con los movimientos en masa en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia la celda mientras que se dispersa en las convexas. Una curvatura cóncava es más efectiva en la captación de agua de lluvia que es un condicionante morfológico característico en la potencial generación de movimientos en masa superficiales (Carrara, 1983, citado por Santacana, 2001). Los trabajos de Horton et al. (2008, 2013)

identifican la curvatura como una característica morfológica potencial de la generación de flujos.

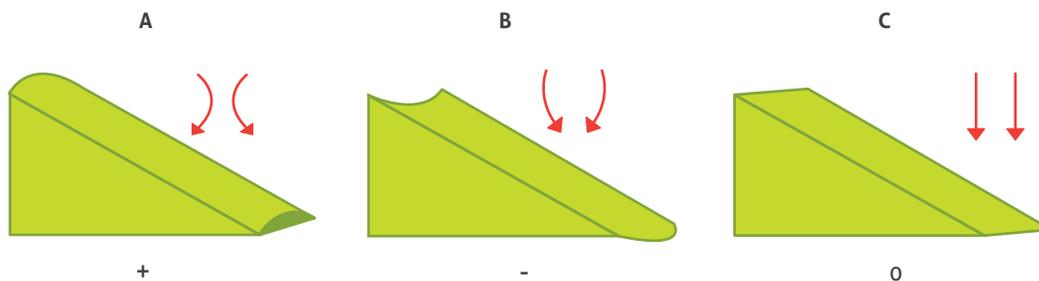
Al igual que con la pendiente del terreno, la clasificación de la curvatura debe ser aplicada con base en el conocimiento del área de estudio y el análisis de los procesos identificados. Cuando la curvatura es derivada del DEM, se recomienda utilizar el método propuesto por Süzen & Doyuran (2004) denominado “método de percentiles”, el cual permitirá clasificar la variable en 3 rangos de igual cantidad de datos, eliminando así un poco la subjetividad.

### 3.2.1.2.3 Subunidades geomorfológicas indicativas de procesos tipo caída y flujo

El mapa de subunidades geomorfológicas constituye un insumo básico para la definición de los escenarios potenciales de amenaza.

Tomando como base la propuesta para la generación de mapas geomorfológicos adoptada por el SGC (2012), se han definido para el análisis específico de procesos tipo caída y aflujo algunas unidades y subunidades geomorfológicas indicativas de dichos procesos, las cuales, sin embargo, no restringen el criterio del experto en el análisis de otras que se consideren relevantes en el estudio de amenaza.

Una subunidad geomorfológica indicativa de inestabilidad es aquella cuyas características morfológicas y morfométricas, así como algunas propiedades intrínsecas (litología, fracturamiento, meteorización, entre otras), se conjugan en un espacio físico y determinan la generación de un movimiento en masa. Una caída por ejemplo, se puede desarrollar en laderas o escarpes expuestos, mientras que la ocurrencia de un flujo de detritos se puede



» **Figura 3.8.** Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente

Fuente: tomado de ESRI (2017).

ver favorecida por ciertas condiciones como la disponibilidad de materiales granulares (bloques, gravas y arenas) en áreas aledañas a corrientes superficiales para ser transportados y posteriormente depositados por la dinámica propia de los cauces.

Para el análisis de procesos tipo caída, en general, se deben tener en cuenta geofomas que se pueden relacionar con la posible inestabilidad de laderas o taludes, considerando ya sea la geofoma en sí misma, o las laderas (o escarpes) que la conforman. En la Tabla 3.8 se propone un listado

de unidades/subunidades a tener en cuenta para el análisis de movimientos en masa tipo caída. Otras subunidades de ambientes denudacionales, como colinas remanentes o inselberg; ambientes estructurales como barras homoclinales; ambientes volcánicos como flujos de lava (almohadillada, cordada o en bloque) y edificios volcánicos o ambientes cársticos, como mesas o torres cársticas, se pueden considerar, siempre que su elección esté enfocada al análisis de amenaza por la ocurrencia de movimientos en masa.

» **Tabla 3.8.** Unidades / subunidades indicativas de procesos tipo caída

GEOFORMAS INDICATIVAS DE PROCESOS TIPO CAÍDA		
AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD/SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ACRÓNIMO
DENUACIONAL	Cono flujos de detritos	Dfe
	Cono de talus	Dct
	Cerro remanente o relicto	Dcrem
	Escarpe de erosión mayor	Deem
	Escarpe de erosión menor	Deeme
	Escarpe facetado	Def
FLUVIAL	Escarpe de abanico fluvial	Fea
	Escarpe de terraza de erosión	Ftee
MARINO COSTERO	Acantilado	Ma
ESTRUCTURAL	Cerro estructural	Sce
	Colina estructural	Sces
	Escarpe de línea de falla	Slfe
	Escarpe de meseta estructural	Sme
	Faceta triangular	Sft
	Ladera contrapendiente	Slcp
	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	Sshlc
	Ladera contrapendiente de sierra anticlinal	Ssalc
	Ladera contrapendiente de sierra sinclinal	Ssslc
	Ladera de contrapendiente de cuesta	Sclc
	Ladera de contrapendiente de espinazo	Selc
	Meseta estructural	Sm
	Ladera estructural de sierra homoclinal	Sshle
	Ladera estructural de sierra anticlinal	Ssale
	Ladera estructural de sierra sinclinal	Sssle
	Ladera estructural de cuesta	Scle
	Ladera estructural de espinazo	Sele
	Plancha	Sp
	Sierra de barras estructurales (Ssbe)	Ssbe
	VOLCÁNICO	Escarpe de flujo de lava (Vfle)
Ladera volcánica (VI)		VI

(.../...)

(.../...)

GEOFORMAS INDICATIVAS DE PROCESOS TIPO CAÍDA		
AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD/SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ACRÓNIMO
GLACIAR	Ladera contrapendiente de sierra homoclinal glaciada	Gshlc
	Ladera contrapendiente de sierra anticlinal glaciada	Gsalc
	Ladera contrapendiente de sierra sinclinal glaciada	Gsslc
	Ladera contrapendiente de cuesta estructural glaciada	Gclc
	Ladera de contrapendiente de espinazo glaciado	Geglc
	Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada	Gshle
	Ladera estructural de sierra anticlinal glaciada	Gsale
	Ladera estructural de cuesta estructural glaciada	Gcle
	Ladera estructural de espinazo glaciado	Gegle
CÁRSTICO	Escarpe cárstico	Kec
ANTRÓPICO	Canteras	Ac
	Explotación minera	Aemc

Fuente: tomado y adaptado de SGC (2012).

En el análisis de procesos tipo flujo se recomienda considerar las geoformas cuyo origen esté relacionado principalmente con corrientes torrenciales que desembocan en zonas planas (denudacionales y fluviales). En la Tabla 3.9 se presenta una lista de las principales subunidades

relacionadas con este tipo de procesos. Dado que esta es una aproximación cualitativa para escala media, la identificación y mapeo de estas unidades no excluye la ejecución de estudios y análisis con herramientas de modelación especializadas.

» **Tabla 3.9.** Unidades/subunidades indicativas de procesos tipo flujo/avenida torrencial

GEOFORMAS INDICATIVAS DE PROCESOS TIPO FLUJO/AVENIDAS TORRENCIALES		
AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD/SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ACRÓNIMO
DENUDACIONAL	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	Dft
	Lóbulo y cono de avalancha de detritos	Dlcad
	Lóbulo y cono de avalancha de rocas	Dlcar
FLUVIAL	Abanico aluvial	Faa
	Abanico aluvial antiguo	Faaa
	Abanico aluvial subcreciente	Faas
	Abanico aluvial actual	Faaac
	Abanico aluvial incisado	Faai
	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (bajadas)	Fac
	Cono de deyección	Fcdy

Fuente: autores.

Como se mencionó anteriormente, durante la ocurrencia de flujos clasificados como avenida torrencial pueden existir además algunas zonas de aporte de sedimentos principalmente relacionadas con depósitos removidos por corrientes, las cuales pueden también ser identificadas a

partir de la cartografía de subunidades geomorfológicas y que, a criterio del experto, se pueden usar como complemento del análisis presentado en este documento. En la Tabla 3.10 se propone un listado de geoformas indicativas de estas posibles zonas de aporte.

» **Tabla 3.10.** Geoformas indicativas de zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales

GEOFORMAS INDICATIVAS DE ZONAS DE APORTE DE SEDIMENTOS EN AVENIDAS TORRENCIALES		
AMBIENTE GEOMORFOLÓGICO	UNIDAD/SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ACRÓNIMO
VOLCÁNICO	Cono lahárico	Vcl
	Escarpe de flujo lahárico aterrazado	Vflae
	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado	Vfpe
	Flujo lahárico aterrazado	Vfla
	Flujo piroclástico aterrazado	Vfp
	Lóbulo de flujo lahárico	Vlfp
	Lóbulo de flujo piroclástico	Vlfl
GLACIAR	Cono y lóbulo de gelifración	Gclg
	Conos glaciofluviales	Gcgf
	Flujo volcánico glaciado	Gfv
FLUVIAL	Albardones o dique natural	Fa
	Complejo de orillales	Fco
	Planicie aluvial confinada	Fpac
	Plano o llanura de inundación	Fpi
	Terraza de acumulación	Fta
	Escarpe de terraza de acumulación	Ftae
	Terraza de acumulación subciente	Ftas
	Terraza de acumulación antigua	Ftan
Plano anegadizo	Fpa	

Fuente: autores.

#### 3.2.1.2.4 Rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad

Durante la elaboración de mapas de subunidades geomorfológicas se identifican algunas características del terreno que no son representadas como subunidades, pero que dan cuenta de la dinámica actual y futura de la zona de estudio. Estas características definidas como rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad, son de interés para el análisis de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa y pueden ser representadas tanto en el inventario de procesos morfodinámicos, como en el mapa de susceptibilidad y amenaza final.

### 3.2.2 Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Los mapas con información geológica constituyen un insumo básico para cualquier análisis y zonificación de amenaza por movimientos en

masa. Dependiendo de la escala de trabajo, la información geológica disponible es interpretada en términos de sus características ingenieriles y complementada con trabajos de fotointerpretación, levantamientos de campo e incluso ensayos de laboratorio, con el fin de obtener información sobre la composición, disposición y comportamiento esperado de los materiales geológicos.

A escala nacional es suficiente con adaptar a una clasificación ingenieril las leyendas geológicas de mapas existentes (escala < 1:100.000) y usar las divisiones del territorio definidas a nivel de formaciones geológicas. Sin embargo, a escalas más detalladas (> 1:25.000) es necesaria la elaboración de mapas de geología para ingeniería que contengan información sobre la litología de los materiales presentes (rocas o suelos), su origen, disposición estructural, características físicas y mecánicas, características hidrológicas e hidrogeológicas, entre otros. Naturalmente, la

base para la elaboración de estos mapas son los mapas geológicos de carácter oficial.

Al igual que con la geomorfología, las unidades geológicas de superficie son uno de los factores condicionantes más importantes en la inestabilidad de las laderas, por lo que es necesario obtener y mapear datos relacionados con sus características. Para la escala de trabajo y metodología propuesta en este documento, se requiere de la elaboración de un mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), cuyos datos serán utilizados directamente como un factor condicionante en el análisis y zonificación de amenaza por movimientos en masa.

Cada UGS se considera como el resultado de una serie de procesos tanto exógenos como endógenos que modelan la superficie terrestre y le confieren al terreno una serie de propiedades que la hacen más o menos susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa.

A continuación se presenta un marco general para la elaboración de mapas de UGS y la información mínima que éstos deben contener, con el fin de definir algunos conceptos importantes para su uso en la zonificación de amenazas por movimientos en masa. La información y conceptos presentados en este documento hacen parte de la metodología de cartografía geológica para ingeniería presentada por INGEOMINAS (2004b).

### 3.2.2.1 Mapas de Unidades Geológicas Superficiales

La geología superficial se refiere al material expuesto en la superficie del terreno, el cual puede corresponder a suelos o rocas, clasificados así desde el punto de vista ingenieril.

Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) corresponden a un conjunto (homogéneo) de materiales geológicos que afloran en la superficie, que provienen del mismo origen y conservan en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánico, hasta algunas decenas de metros por debajo de la superficie del terreno (Tomado y adaptado de Hermelín, 1985 e INGEOMINAS, 2004b). En estos mapas se clasifican los materiales superficiales en suelos y rocas; las UGS incluyen los diferentes tipos de rocas clasificadas según su origen y

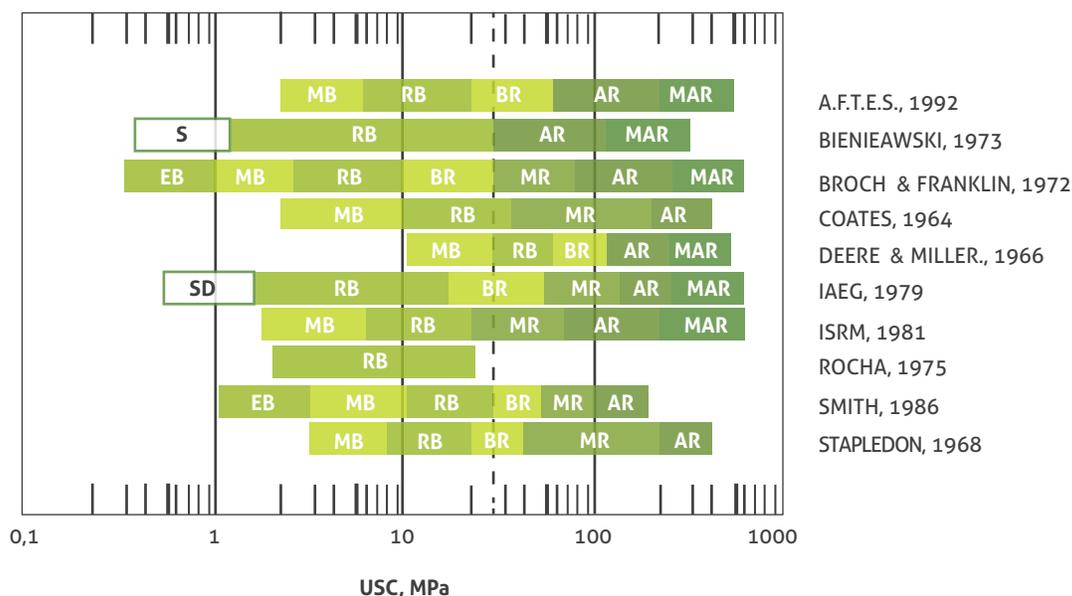
composición mineralógica, grado de meteorización o alteración, dureza o resistencia e índice de resistencia geológica (GSI), así como, los suelos diferenciados de acuerdo con su origen, composición mineralógica, clasificación genética, características y propiedades del suelo, estructura o empaquetamiento, selección, gradación, color, tamaño, forma y composición de las partículas, grado de meteorización, consistencia, resistencia, condición de humedad, densidad relativa, compacidad, propiedades de la masa del suelo, estructuras relictas o discontinuidades en la masa de suelo y propiedades ingenieriles.

En varios trabajos se ha presentado la diferenciación entre roca y suelo con base en la resistencia a la compresión simple de la roca intacta. Sin embargo, cuando se trabaja con rocas blandas o suelos endurecidos, es difícil establecer un límite único de resistencia que permita una distinción clara (Figura 3.9). En este trabajo, se proponen como base las definiciones de Selby (1993), en las que se considera roca a un material compuesto de granos minerales y cristales estrechamente unidos entre sí mediante sustancias cementantes y entramamiento de cristales. Es una sustancia dura, elástica, que no se ablanda significativamente al ser sumergida en agua. Si se considera como un macizo rocoso, es un material con discontinuidades que lo dividen en bloques individuales, estas discontinuidades controlan en gran medida la resistencia del macizo rocoso a las fuerzas que actúan sobre éste, y no como la resistencia de los granos, cristales o material cementante que mantiene los bloques juntos.

El suelo es un depósito suelto o blando de origen natural formado en la superficie de la Tierra, el cual se debilita o ablanda por inmersión en agua; puede ser el resultado de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan para producir un material rico en materia orgánica con horizontes característicos (capas) a poca profundidad. El suelo se puede formar a partir de la erosión o meteorización de rocas más duras o de suelos más antiguos “in situ”, o puede ser material transportado o depositado como una formación geológica blanda. Cualquiera que sea su origen, se puede definir como un material particulado, cuyas propiedades están controladas por el tamaño de las partículas que los conforman,

forma, gradación, contactos, enlaces químicos entre partículas y agregados. Otros factores que controlan las propiedades de los suelos son los espacios vacíos y el fluido en los poros. Esta definición de suelo incluye los depósitos sedimen-

tarios jóvenes inconsolidados, tales como loess, aluviones, depósitos glaciares y piroclásticos no soldados, así como regolitos y suelos pedogénicos (Selby, 1993).



» **Figura 3.9.** Clasificación de rocas de acuerdo con su resistencia

Fuente: adaptado de (Galván, 1999, citado por Kanji, 2014).

En Colombia varios autores han trabajado una clasificación de UGS de acuerdo con su origen como se presenta en la Tabla 3.11 (Hermelín, 1985; INGEOMINAS, 2001, 2004b). Estas comprenden:

- » Rocas y sus estructuras
- » Suelos residuales (saprolito y suelo residual del perfil de Dearman, 1974, 1991)
- » Depósitos de origen volcánico
- » Depósitos transportados
- » Depósitos antrópicos

» **Tabla 3.11.** Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen

TIPO DE MATERIAL	ORIGEN DE LA UGS	TIPO DE UGS	
Roca	Roca inalterada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Roca dura (Calidad de macizo buena y muy buena)</li> <li>• Roca intermedia (Calidad de macizo regular)</li> <li>• Roca blanda (Calidad de macizo mala y muy mala)</li> </ul>	
	Derivadas de roca In situ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelo residual: Horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI.</li> </ul>	
	Depósitos volcaniclásticos primarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caídas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza).</li> </ul>	
	Depósitos volcaniclásticos secundarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lahar, avalancha de escombros</li> </ul>	
Suelo	Suelo transportado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluviones recientes y de cauce activo</li> <li>• Llanura aluvial</li> <li>• Abanicos o conos aluviales</li> <li>• Terrazas aluviales</li> <li>• Depósitos fluviotorrenciales</li> </ul>	
		Depósitos lacustres y paludales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelos fluviolacustre</li> <li>• Suelos paludales</li> </ul>
		Depósitos costeros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deltas, Barras, Playas, etc.</li> </ul>
		Depósitos eólicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dunas y Médanos</li> <li>• Loess</li> </ul>
	Depósitos glaciares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Morrenas y Tillitas</li> <li>• Suelos Fluvioglaciares</li> </ul>	
	Depósitos de gravedad y ladera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coluvial</li> <li>• Talus, derrubios de pendiente</li> <li>• Flujos (de lodo, tierra y de escombros)</li> </ul>	
	Depósitos antrópicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Llenos de basuras</li> <li>• Llenos de escombros</li> <li>• Llenos mixtos</li> </ul>	

Fuente: modificado de Hermelín (1985).

En los siguientes numerales se presentan algunos lineamientos y criterios básicos para la elaboración del mapa de UGS, aplicado a zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000.

### 3.2.2.1.1 Elaboración del mapa de unidades geológicas superficiales

Para la elaboración de un mapa de UGS se proponen cuatro etapas básicas: la recopilación y análisis de información temática secundaria, la interpretación de la información temática y de imágenes de sensores remotos con la cual se obtiene el mapa de UGS preliminar; la validación de campo, la integración de la información y la presentación de los productos finales, entre ellos el mapa de UGS, perfiles geológicos y columnas estratigráficas tipo (Figura 3.10).

La primera etapa consiste en recopilar insumos básicos e información temática, secundaria o primaria, que ayuden a definir en forma adecuada las unidades temáticas. Se requiere de toda la información de geología y geomorfología disponible, a escalas regional y detallada, estudios de suelos, geotécnicos, hidrogeológicos y ambientales.

El proceso de análisis e interpretación de imágenes de sensores remotos se puede dividir en varias fases, y su objetivo es obtener la mayor información de las fotografías aéreas o las imágenes de sensores remotos, dependiendo del propósito en particular de la investigación, el cual en este caso es la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Estas fases son: lectura de la fotografía o imagen (detección, reconocimiento e identificación), análisis, clasificación



» **Figura 3.10.** Flujograma de actividades en la generación del mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Fuente: autores.

y deducción (van Zuidam, 1986). Con la interpretación se procede a realizar la representación cartográfica de las diferentes unidades, tanto de roca como de suelo, teniendo en cuenta su homogeneidad, para obtener así el mapa fotogeológico que será la base para la posterior etapa de comprobación de campo.

La fase de validación de campo, tiene como objetivo la toma de datos y de muestras, que permitan caracterizar las unidades de roca y suelo, así como corroborar, corregir y complementar el modelo geológico preliminar de la zona, planteado con base en el análisis de la información secundaria y de la fotointerpretación. Con el fin de unificar el levantamiento de información en campo que permita caracterizar las UGS, en el Anexo 3.2.2 se presenta una guía de campo que incluye los formatos de captura de información.

En la etapa de integración de la información y la presentación de los productos finales, se elaboran los mapas de UGS y las respectivas memorias explicativas de las unidades identificadas en el área de estudio

#### 3.2.2.1.2 Criterios para la definición de las Unidades Geológicas Superficiales

En la elaboración de mapas de UGS, la clasificación de rocas y suelos debe estar basada en el principio de que las propiedades físicas de dichos materiales en su estado actual dependen de la combinación de elementos como el origen, la diagénesis, la historia tectónica, el metamorfismo y los procesos de meteorización, los cuales controlan su comportamiento mecánico.

Para la descripción y caracterización de las UGS se tienen en cuenta cinco parámetros fundamentales: génesis, litología (composición y textura), propiedades ingenieriles, grado de meteorización y rasgos estructurales. Estas características pueden obtenerse mediante la descripción de perfiles de afloramientos rocosos, exploración de campo, muestreo de suelos y rocas y ensayos índice, los cuales pueden complementarse con exploración del subsuelo, ensayos in situ y análisis de laboratorio que pueden definirse a criterio del experto en la medida en que se requiera un mejor conocimiento del comportamiento de los materiales.

A continuación se definen, clasifican y describen los parámetros utilizados, cuyo detalle se presenta en el Anexo 3.2.2:

- » Génesis: esta característica corresponde al origen del material. Para la clasificación de la génesis de los suelos se puede tomar como referencia la Tabla 3.11. Para la clasificación de las génesis de las rocas se puede tomar como referencia la Tabla 1 del Anexo 3.2.2.
- » Litología: trata de la composición mineralógica de las rocas y suelos y de la forma como dichos componentes se interrelacionan (textura).
- » Propiedades ingenieriles: desde el punto de vista ingenieril cada tipo de roca o suelo tiene unas propiedades que se relacionan de manera directa con su origen y composición y, por consiguiente, con el comportamiento geomecánico de los materiales cuando se encuentran expuestos en superficie, entre estas se incluyen: dureza o resistencia, consistencia, condición de humedad, densidad relativa y compacidad.
- » Clasificación geomecánica: el comportamiento geomecánico de macizos rocosos puede ser analizado y clasificado de acuerdo con su potencial para ser usado en determinadas aplicaciones (González de Vallejo et al., 2002). Existen diferentes métodos para clasificar geomecánicamente un macizo rocoso, los cuales permiten obtener índices de calidad del macizo a través de la observación directa de sus características físicas o mediante la realización de pruebas de campo. Como insumo para la definición de las UGS correspondientes a roca con fines de zonificación de amenazas por movimientos en masa, se propone como mínimo el uso del *índice Geológico de Resistencia* (GSI, por sus siglas en inglés), el cual es un sistema que utiliza el carácter geológico del material rocoso junto con la evaluación visual del macizo, como una forma para la selección de parámetros que permiten la predicción de su resistencia y deformabilidad (Marinos et al., 2005). Su función es la estimación de propiedades y no reemplaza sistemas cuya función está dirigida al análisis detallado de macizos rocosos a nivel de diseño.

- » Grado de meteorización: Es la descripción cualitativa del estado de meteorización de los materiales tomando en cuenta la distribución y proporción relativa de la meteorización en el macizo rocoso y en sus discontinuidades. La meteorización tiene un efecto sobre la resistencia y comportamiento mecánico del macizo rocoso, por lo tanto, es importante definir el grado de meteorización de las rocas, para lo cual se utilizan los perfiles generalizados de Deere & Patton (1971) y Dearman (1974, 1991). Es importante mencionar que en esta propuesta metodológica se considera como suelo a los horizontes VI (suelo residual), V (roca completamente meteorizada o descompuesta, saprolito fino) y IV (roca altamente meteorizada o descompuesta, saprolito grueso) del perfil de meteorización de Dearman (1974, 1991). El saprolito se define como el manto meteorizado que se comporta en general como un suelo en términos geotécnicos y que presenta rasgos texturales y estructurales de la roca madre, y el cual sumado con el horizonte VI conforma el suelo residual tropical (Anon, 1990, citado por Aristizabal et al., 2011).
- » Rasgos estructurales: representa la serie de procesos geodinámicos endógenos propios de la evolución de la corteza terrestre. En consideración a que la deformación de la corteza es proporcional a la cantidad de pliegues y fracturas (fallas, lineamientos y diaclasas), en un área determinada se debe evaluar la densidad de estos rasgos estructurales.

El término fractura abarca cualquier rotura en la roca, que puede o no provocar un desplazamiento por una falla mecánica debido a esfuerzos y que a la vez, causa pérdida de cohesión. El término incluye grietas, diaclasas y fallas (Bates & Jackson, 1980, citado por PMA: GCA, 2009). El fracturamiento en un macizo rocoso es el resultado de estos esfuerzos que han excedido la resistencia a la ruptura de los materiales. Estas fracturas por lo general son producto de la deformación frágil en cualquier tipo de roca, las cuales se forman por esfuerzos cortantes y en zonas de tensión o de compresión, que son generadas por fallas. Además existen otros tipos de

mecanismos que explican la génesis de las fracturas (discontinuidades), las cuales son: pérdida de carga, pérdida de volumen, enfriamiento, por efecto de la diagénesis y por la actividad biológica. En general estas discontinuidades son el producto de la respuesta de las rocas antes diferentes esfuerzos. El GSI se presenta como un método sencillo a nivel ingenieril para clasificar las discontinuidades y su efecto en el comportamiento de un macizo rocoso; este índice permite valorar de manera rápida si un macizo rocoso ha sido sometido a diferentes tipos de esfuerzos y la valoración del carácter geológico del material rocoso (Marinos et al., 2007). El (GSI) está basado en una valoración de la litología, la estructura y las condiciones de las superficies de discontinuidades dentro del macizo rocoso, y es estimado mediante un examen visual de macizo rocoso en los afloramientos, en excavaciones superficiales como en cortes de carretera y en las caras de túneles y núcleos de testigos (Marinos et al., 2007).

Como resultado de la aplicación de estos parámetros se obtiene una descripción sistemática de cada unidad representada en el mapa, de acuerdo con los lineamientos metodológicos presentados en INGEOMINAS (2004b). Para la definición de las unidades de suelo se recomienda el siguiente orden de descripción: génesis, propiedades ingenieriles y litología, las cuales deben ser complementadas con información del grado de meteorización, rasgos estructurales y espesor del suelo. A manera de ejemplo, si se tiene un suelo residual fino-granular derivado de depósitos volcánico-lásticos, la unidad será identificada como: Suelo residual cohesivo del conjunto Río Hondo (Srcrhh). En el caso de unidades de roca se recomienda realizar la descripción en el siguiente orden: clasificación geomecánica, litología, génesis y propiedades ingenieriles complementadas con información sobre el grado de meteorización y rasgos estructurales. Una unidad correspondiente a un macizo rocoso de areniscas de buena calidad será identificada de la siguiente manera: roca dura de arenisca de la Formación Aguardiente (Rdafa) o macizo rocoso de arenisca tipo II de la Formación Aguardiente

(Mrafa-II). Los estándares para la nomenclatura y simbología de los mapas de UGS se presentan en INGEOMINAS (2004b).

### 3.2.2.2 Mapas de unidades geológicas superficiales (UGS) para la zonificación de amenazas por movimientos en masa

En el mapa de UGS se representan una serie de datos que se consideran causales de la ocurrencia de movimientos en masa (ver Tabla 3.1). Tomando en cuenta que los criterios para la definición y cartografía de cada UGS ya incluyen estos datos, en esta propuesta los polígonos de UGS serán incluidos directamente en el análisis de amenaza, sin necesidad de extraer atributos en capas de información independientes.

Con respecto a las fallas y su relación con los movimientos en masa, es importante comentar que, aunque en varias zonas de estudio ha sido recurrente el uso de la distancia a fallas como un factor condicionante de susceptibilidad, en esta propuesta no se recomienda hacer uso de este tipo de información. Por supuesto, pueden existir excepciones soportadas en el conocimiento experto de cada zona de estudio, como en el caso de fallas activas, en las que no basta solo con conocer la distancia a la zona de ruptura, sino también aspectos como el tipo de falla, longitud esperada de la ruptura, profundidad de sismos, magnitud, entre otros.

Como se aborda en este documento, la relación entre fallas y movimientos en masa se evalúa desde el punto de vista de la caracterización de los macizos rocosos, en los que el alto grado de fracturamiento, mayor profundidad de perfiles de meteorización y características de resistencia desfavorables, están directamente relacionados con zonas de falla. Naturalmente, la incidencia de las fallas en la calidad de los macizos rocosos debe estar soportada en el levantamiento de información tanto a partir de interpretación de imágenes como con trabajo de campo a la escala de análisis.

### 3.2.3 Cobertura de la tierra y uso del suelo

Otro de los factores condicionantes importantes en la ocurrencia de movimientos en masa es el

cambio en la cobertura de la tierra, ya sea por causas naturales (como los incendios, remoción de suelo, entre otras) o por causas antrópicas (deforestación, uso intensivo del suelo, entre otras). La cobertura de la tierra y el uso del suelo en general son considerados factores estáticos dentro de los análisis de amenaza y pueden ser incluidos como capas de información independientes que representan las condiciones actuales de vegetación o la dinámica antrópica dentro del territorio (van Westen et al., 2008).

Los efectos de la vegetación sobre la estabilidad de taludes han sido ampliamente estudiados por diferentes autores (Reichenbach et al., 2014; Sidle & Ochiai, 2006; Mugagga et al., 2011; Suárez, 1998; Corina et al., 2016; Löffler et al., 2011), y en general se han descrito tanto desde el punto de vista mecánico, como desde el punto de vista hidrológico.

Los efectos mecánicos que contribuyen a la estabilidad (incrementando las fuerzas resistentes) son los relacionados con factores como el soporte del suelo por enraizamiento, control de erosión, resistencia del sistema suelo edáfico-raíces y protección del suelo (Charman & Murphy, 2000). La sobrecarga generada por la vegetación y aumentada por las fuerzas del viento y la pendiente, es otro efecto mecánico que en ocasiones se suele considerar desfavorable a la estabilidad (Suárez, 1998).

Los efectos hidrológicos están relacionados con la ocurrencia de movimientos en masa superficiales por efectos de la baja interceptación de la lluvia por parte de la cobertura de la tierra, aumento de la capacidad de Infiltración, cambios en el contenido de agua en el suelo por evapotranspiración y efectos sobre la conductividad hidráulica (Suárez, 1998; van Westen et al., 2008).

En la Tabla 3.12 se describe la influencia relativa de la vegetación natural y seminatural en la estabilidad de laderas.

Los cambios en el uso del suelo tienen una gran influencia sobre la estabilidad de las laderas, ya que se ha visto, en las regiones con mayor dinámica poblacional, el impacto de los seres humanos en el medio ambiente contribuyendo significativamente a la iniciación y la reactivación de movimientos en masa (Reichenbach et

al., 2014). Se ha observado que el aumento y la conversión de los bosques secundarios a pastizales y/o las tierras de cultivo, inciden en el incremento de los movimientos superficiales y que el abandono de campos de cultivo induce a una significativa disminución de la frecuencia de deslizamientos y pérdida de suelo (Reichenbach et al., 2014). Las coberturas densas ofrecen una mejor protección; contribuyen a la disipación de la energía de la lluvia lo que genera un mayor factor de protección al suelo. Hay muchos ejemplos que demuestran que el incremento en la tasa de pérdida del suelo y ocurrencia de movimientos en masa son sucesivos a la pérdida o remoción de la vegetación (Charman & Murphy, 2000). Los factores determinantes que generan

cambios de cobertura de la tierra son la deforestación, degradación e intensificación en el uso del suelo, actividad socioeconómica, y políticas de uso (Olaya & Rojas, 2014, Lambina et al., 2001, Sánchez, 2014, Armenteras & Rodríguez, 2014, Mugagga et al., 2011).

No obstante, se debe tener en cuenta que no todos los cambios de uso generados por el ser humano producen efectos negativos, ya que muchas medidas de intervención antrópica que implican cambios en el uso buscan reducir, mitigar o corregir problemas de inestabilidad. En cualquier caso, la relación entre la posible ocurrencia de movimientos en masa y los cambios en la cobertura de la tierra o el uso del suelo, dependen de las particularidades de cada zona de estudio.

» **Tabla 3.12.** Influencia relativa de la vegetación natural y seminatural en la estabilidad de los taludes

MECANISMOS	DESIZAMIENTOS SUPERFICIALES	DESIZAMIENTOS PROFUNDOS
<b>MECANISMOS HIDROLÓGICOS</b>		
Intercepción de la lluvia y nieve por la cobertura vegetal, lo que permite mayor evaporación y reduce el agua disponible a la infiltración.	B	B
El sistema radicular extrae agua del subsuelo para propósitos fisiológicos (vía transpiración), reduciendo los niveles de humedad del suelo.	B	B
El sistema radicular y la capa orgánica del subsuelo aumenta la rugosidad de la superficie e incrementa la capacidad de infiltración.	MA	MA
La disminución de la humedad del suelo puede causar grietas por desecación, aumentando la capacidad de infiltración y facilitando la llegada de agua al plano de falla a mayor profundidad.	MA	MA
<b>MECANISMOS MECÁNICOS</b>		
Las partes robustas de las raíces arbóreas sirven de anclaje del suelo a estratos subyacentes más estables.	B	MB
Las raíces robustas atraviesan planos de debilidad a lo largo de los flancos de deslizamientos potenciales.	B	B
Las raíces proporcionan una membrana de refuerzo a la capa del suelo y al aumento de resistencia al corte del suelo.	B	B
Las raíces robustas de la vegetación arbórea anclan el suelo en el estrato firme, dando soporte a la capa superficial de suelo debido a su reforzamiento mecánico y efecto de arco.	B	MB
El peso de los árboles (sobrecarga) aumenta la fuerza actuante en sus componentes, normal y paralela a la dirección de la pendiente.	MA/MB	MA/MB
El viento transmite cargas dinámicas al subsuelo a través de los troncos de los árboles	A	MA

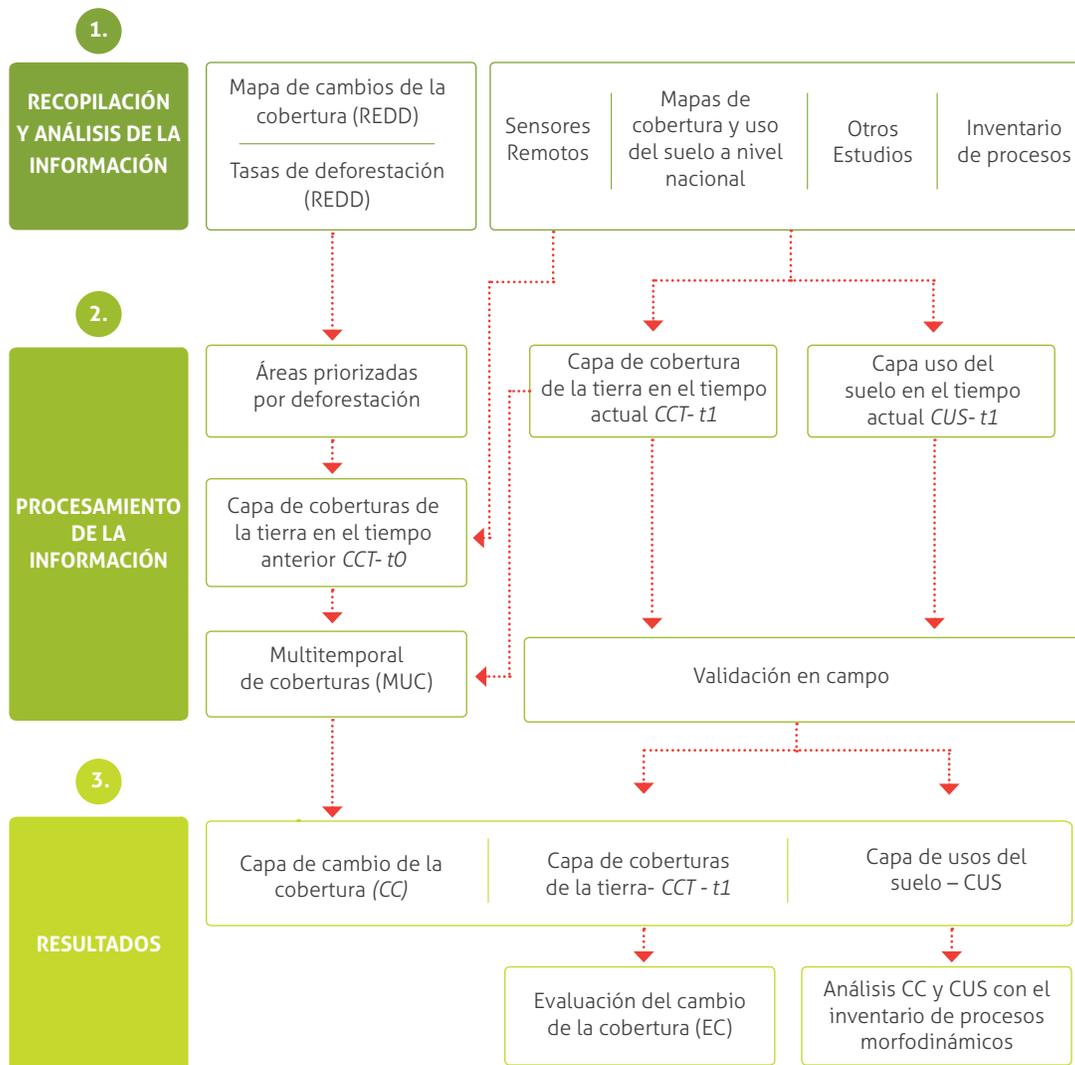
A = mecanismos adversos para la estabilidad; MA = Marginalmente adversa; MB = Marginalmente beneficioso; B = Mecanismos beneficiosos.

Fuente: tomado y traducido de Sidle & Ochiai (2006).

En esta guía, en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, como un factor condicionante relacionado con la cobertura de la tierra, se ha considerado incluir dos capas de información: las unidades de uso del suelo o el mapa de cambio de la cobertura referida al análisis comparativo entre dos épocas con coberturas distintas. La obtención de esta información se basa en la metodología presentada en la Figura 3.11. Es importante aclarar que la elaboración del mapa de uso del suelo actual se realiza a partir de las unidades de cobertura de la tierra.

La cobertura de la tierra actual (últimos tres años) se obtiene siguiendo los lineamientos o

parámetros temáticos y cartográficos definidos en la metodología Corine Land Cover (IDEAM et al., 2008). El mapa de uso actual se obtiene a partir de las unidades de cobertura de la tierra actual de acuerdo con la leyenda propuesta por el IGAC (2005b), complementado con información secundaria y primaria de uso específico del territorio. El mapa de cambio de la cobertura se define de la comparación en función de la pérdida o ganancia del área de las coberturas identificadas en diferentes periodos interpretados. Para establecer el cambio de cobertura, se requiere evaluar los cambios producidos entre 2 o más fechas de referencia (cobertura actual y cobertura en un



» **Figura 3.11.** Metodología para la generación de la variable cobertura de la tierra y uso del suelo, utilizada para el proceso de zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000.

Fuente: autores.

tiempo anterior que se recomienda máximo de diez años atrás); esto con el fin de evaluar la dinámica a largo plazo de un determinado proceso (crecimiento urbano, deforestación, expansión agrícola) que posteriormente se relaciona con el inventario de procesos morfodinámicos.

En los siguientes numerales se describe un marco general para la elaboración de los mapas de cobertura de la tierra y usos del suelo, con el objeto de detallar algunos conceptos importantes para su interpretación y uso en la zonificación de amenazas por movimientos en masa. La metodología de cartografía de cobertura de la tierra y uso del suelo se basa en el trabajo desarrollado por el IDEAM et al. (2008), IGAC (2005b) y Minambiente (2014), a partir del cual se realiza una adaptación metodológica para la evaluación de la cobertura de la tierra y los usos del suelo en estudios de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 3.11.

### 3.2.3.1 Mapas de cobertura de la tierra y usos del suelo

A continuación, se definen algunos conceptos básicos para la elaboración de estos mapas:

**La cobertura de la tierra** describe la vegetación, los elementos antrópicos existentes y otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (IDEAM, 2012). Estas se pueden originar en ambientes naturales producto de la evolución ecológica (bosques, sabanas, lagunas, entre otros) o a partir de ambientes artificiales creados o mantenidos por el ser humano (cultivos, represas, ciudades, entre otros) (IGAC, 2005b).

**Metodología Corinne Land Cover** es una metodología de identificación que realiza el inventario homogéneo de la cubierta biofísica (cobertura) de la superficie de la tierra a partir de la interpretación visual de imágenes de sensores remotos asistida por computador y la generación de una base de datos geográfica (IDEAM, 2010); abarca 5 grandes categorías que incluyen los territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua.

**El uso del suelo** es la utilidad que presta la cobertura de la tierra al ser humano, las funciones económicas de una porción específica de la Tierra (como el uso urbano o industrial, de reserva natural, entre otros) (IDEAM, 2012); o la dinámica antrópica implementada en cada una de las unidades de cobertura. El término uso se aplica al empleo o aprovechamiento cíclico o permanente que el ser humano da a los diferentes tipos de cobertura para satisfacer sus necesidades materiales o espirituales (IGAC, 2005b). Por lo tanto, se entiende que el uso de la tierra apunta a la producción de bienes y servicios para la población y su dinámica, es un indicador de los cambios en la cobertura de la tierra (IGAC & UPRA, 2015).

**La capa de cambio de la cobertura de la tierra** permite determinar y representar espacialmente la variación de la cobertura entre dos instantes de tiempo t1 y t2. (IDEAM, 2013).

Para la construcción de las temáticas de cobertura de la tierra en el tiempo actual (CCT-t1), tiempo anterior (CCT-t0) y el mapa de uso del suelo en el tiempo actual (CUS-t1) se han definido dos etapas básicas, las cuales corresponden a:

#### 3.2.3.1.1 Recopilación y análisis de la información

Búsqueda, recopilación y análisis de la información secundaria como estudios de cobertura de la tierra, suelos y manejo de tierras del IGAC, estudios de erosión, conflictos de uso del suelo, encuestas agropecuarias de diferentes años, estudios de usos del suelo generados por la UPRA, los mapas de cambio de las coberturas de bosque y no bosque del proyecto de cuantificación de la deforestación en Colombia (REDD – Reducción de emisiones por deforestación y degradación de suelos), liderado por el IDEAM desde el año 2012 y estudios de ordenamiento territorial.

Adicionalmente esta etapa contempla la búsqueda de imágenes de sensores remotos como base para la respectiva interpretación. Para esta labor se deben seguir las siguientes recomendaciones generales:

- » Realizar una evaluación de la resolución de la imagen (Chuvieco, 1995). La resolución

implica 4 manifestaciones las cuales definen la exactitud cartográfica de la escala propuesta, estas son: espacial (tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, denominada pixel), espectral (número y anchura de las bandas espectrales que puede detectar un sensor), radiométrica (número máximo de niveles digitales que puede detectar un sensor óptico – electrónico) y temporal (frecuencia de cobertura que proporciona el sensor y la periodicidad con que este adquiere datos de la misma porción de la superficie terrestre) (IGAC, 2005b).

- » Para definir el sensor apto para la escala de estudio se debe tener en cuenta que la temporalidad de los sensores está sujeta a la disponibilidad. Para cada momento del periodo a analizar (actual y anterior) es preferible usar imágenes con la menor diferencia temporal posible, una variación de adquisición de más o menos uno o tres años a partir de la fecha establecida como referencia. Para definir el periodo de análisis multitemporal (Figura 3.12) se toma como fechas de referencia la de la imagen más antigua para interpretación de la capa actual y la de la imagen más antigua disponible para la interpretación de la capa

en el tiempo anterior; se recomienda trabajar con imágenes en periodos de al menos 10 años de antigüedad. Además, de acuerdo a la disponibilidad, se sugiere en las zonas ubicadas en clima seco, seleccionar al menos una imagen para cada temporada climática (época seca/época húmeda).

- » La resolución espacial mínima recomendada de las imágenes para la escala de trabajo es de 10 m (Universidad Nacional de San Juan, 2016) y se puede complementar con información en diferentes escalas tanto de cobertura de la tierra como de usos del suelo. Imágenes de alta resolución también se pueden utilizar para el desarrollo de esta etapa. En la Tabla 3.13 se presentan algunos de los sensores remotos cuyas imágenes se pueden aplicar a la escala de estudio.
- » El indicador de la calidad técnica de los datos (presencia de errores radiométricos, efectos nocivos, entre otros), de acuerdo con el proveedor de imágenes, corresponde a un valor entre 0 y 9. Se prefieren imágenes con calidades mayores o iguales a 7, según el protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia (Cabrera et al., 2011).



» **Figura 3.12.** Definición del periodo de análisis multitemporal

Fuente: autores.

» **Tabla 3.13.** Resoluciones de diferentes Satélites y sensores remotos con imágenes disponibles en Colombia

ESCALA	SENSOR	RESOLUCIÓN (m)	AGENCIA	COSTO (U\$/km²)*
Media	Spot4-HRVIR-2	10	Spot Image	0,90
	Spot5-HRVIR2/HRG	10-5	Spot Image	0,90
	ALOS AVNIR -2	10	JAXA	0,08
	Rapid Eye	5-10	DLR	1,65
	LISS - IV	5-8	ISRO	0,39
	RADARSAT2( Modo Fino)	8	CSA	3,12
	TH01 y TH02	10	SPACE EYE - BESEI	2,5
	SENTINEL	10-20	ESA	Gratis
	Imágenes de Alta Resolución	5-10	IGAC	3,12
	Fotografías aéreas	Depende de la escala de toma	IGAC	5/Foto

\*Valores aproximados de referencia

Fuente: Cabrera et al. (2011).

Esta etapa inicial contribuye en gran medida al aseguramiento de la calidad del producto final, ya que de una buena imagen depende una muy buena interpretación y generación de datos.

Si es necesario, en el caso de las imágenes de satélite se sugiere implementar actividades de mejoramiento, con el fin de contar con un adecuado insumo base de la interpretación. Para ello se recomienda verificar el sistema de referencia de las imágenes, calibración radiométrica, corrección atmosférica y geométrica y cargar adecuadamente las bandas que se utilizan para la respectiva interpretación de cobertura de la tierra. Esta etapa es muy importante ya que se debe asegurar que todas las imágenes a utilizar en los diferentes periodos de interpretación se encuentren en el mismo sistema de referencia para no incurrir en errores en la generación del multitemporal (IDEAM, 2011).

En Colombia entidades del orden nacional como el IGAC, IDEAM, SIMCI, ANLA, Corporaciones Autónomas Regionales, entre otras, cuentan con algunos repositorios de información espacial (imágenes de satélite), las cuales se deben tener en cuenta en la etapa de recopilación de la información. Adicionalmente el IGAC lidera el grupo de infraestructura de datos espaciales y el Banco Nacional de imágenes donde se

pueden descargar varios tipos de imágenes desde la web.

En las zonas donde se existan mapas de cobertura de la tierra y usos del suelo a escala 1:25.000 en el tiempo actual, se debe realizar la reinterpretación de las unidades de coberturas con presencia de nubes para contar con una capa temática completa. Todas las imágenes a utilizar en la etapa de interpretación y reinterpretación deberán seguir una estructura de organización de la información con el fin de evitar errores en el manejo de los insumos.

### 3.2.3.1.2 Elaboración de mapas de cobertura de la tierra y usos del suelo en el tiempo actual

El mapa de cobertura de la tierra se elabora con la metodología Corine Land Cover (Coordination of information on the environmental), la cual se introdujo en Colombia en el año 2004, mediante el trabajo interinstitucional de entidades como el IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA (IDEAM et al., 2008), y el mapa de usos del suelo en el marco de la metodología del IGAC generada en el año 2005 y adaptada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2014. Estas metodologías dan los lineamientos técnicos (temáticos y cartográficos) para generar la

información; la temática de uso del suelo además debe ser complementada con la información secundaria recopilada en la etapa anterior y con el diligenciamiento en campo de la planilla de verificación de cobertura de la tierra y uso del suelo presentada en el Anexo 3.2.3, como apoyo en la definición de la unidad de uso. En el caso en que se cuente con los respectivos mapas, se deberá revisar y verificar que se encuentren en el marco de las metodologías mencionadas, en caso de no cumplir esta condición se deberán adaptar y ajustar a las metodologías propuestas.

### 3.2.3.2 Cobertura de la tierra y usos del suelo para la zonificación de amenazas por movimientos en masa

Una vez obtenidos los mapas de coberturas de la tierra y uso del suelo, se debe elaborar el mapa de cambio de las coberturas de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 3.13 descrito a continuación. Las leyendas de los mapas han sido adaptadas y generalizadas con el fin de uti-

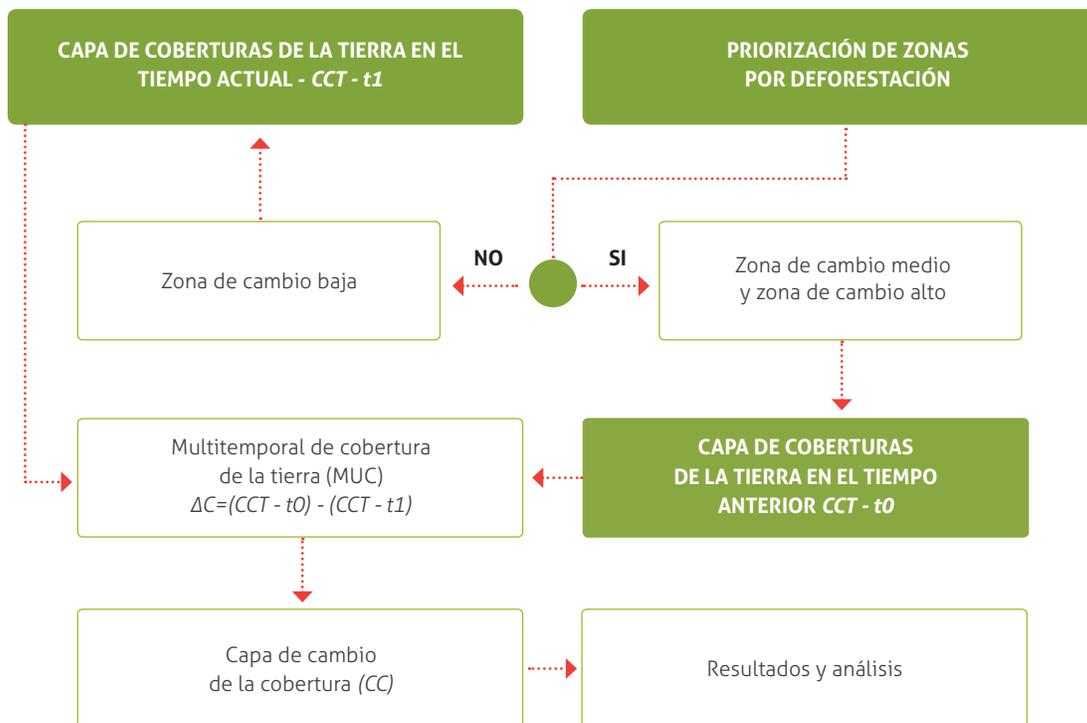
lizar los datos de las temáticas en la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

#### 3.2.3.2.1 Capa cobertura de la tierra (CCT-t1)

Esta capa hace referencia al mapa de cobertura de la tierra en el tiempo actual.

Aunque Colombia no cuenta con una capa de cobertura escala 1:25.000, se ha adoptado la metodología Corine Land Cover teniendo en cuenta las diferencias cartográficas de mapeo que implica la escala y adaptando la leyenda a los objetivos propios de cada estudio, pero manteniendo el enfoque de jerarquización y clasificación de las coberturas.

En esta propuesta, conservando los lineamientos que define Corinne Land Cover en cada una de las etapas de producción y teniendo en cuenta los parámetros cartográficos de la escala (1:25.000), como son la unidad mínima de mapeo (1,5625 ha), escala de digitalización en pantalla (1/3 de la escala) y ancho de ríos y vías



» **Figura 3.13.** Esquema para la generación de la capa de cambio de cobertura utilizado en zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000

Fuente: autores.

de 14 m, se recomienda la adaptación de la leyenda de cobertura de la tierra para zonificación de susceptibilidad, respetando los criterios temáticos de clasificación de la siguiente manera:

- » Es suficiente definir unidades de cobertura a tercer nivel de clasificación de la leyenda nacional de coberturas 1:100.000 (50 unidades de cobertura de la tierra). En la Tabla 3.14 se presenta la leyenda de cobertura de la tierra para escala 1:25.000.
- » Se definen las unidades de cobertura de la tierra que se usan en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa generalizando algunas unidades de tercer nivel al segundo nivel de acuerdo con la Tabla 3.15. La leyenda detallada con sus respectivas definiciones y su relación con el uso del suelo se puede consultar en la Tabla 2 del Anexo 3.2.3. La unidad de bosques debe ser ajustada con base en la leyenda de reducción de emisiones por deforestación y degradación de suelo – REDD (códigos de cobertura 3.1.1 y 3.1.2 del Anexo 3.2.3).
- » Se requiere una actividad de campo equivalente a un máximo del 15% del área con el fin de verificar las unidades de cobertura de la tierra interpretadas, teniendo en cuenta los lineamientos metodológicos de Corine Land Cover. En las zonas donde se tengan las coberturas interpretadas, esta actividad en campo contribuye a la definición de las unidades de uso del suelo con la ayuda de la planilla de verificación de coberturas y uso del suelo propuesta en la Tabla 1 del Anexo 3.2.3.
- » En el caso en que se tenga la capa de cobertura de la tierra, se requiere realizar la homogenización de las unidades de la leyenda definida en esta propuesta y generar la capa de cobertura con la respectiva leyenda para el análisis de susceptibilidad.

» **Tabla 3.14.** Leyenda Tercer nivel Corine Land Cover

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	
1. Territorios artificializados	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo	
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo	
		1.1.3. Construcciones rurales	
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales	
		1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	
		1.2.3. Zonas portuarias	
		1.2.4. Aeropuertos	
		1.2.5. Obras hidráulicas	
	1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	1.3.1. Zonas de extracción minera	
		1.3.2. Zonas de disposición de residuos	
	1.4. Zonas verdes artificializadas no agrícolas		
	2. Territorios agrícolas	2.1. Cultivos transitorios	2.1.1. Otros cultivos transitorios
			2.1.2. Cereales
			2.1.3. Oleaginosas y leguminosas
2.1.4. Hortalizas			
2.1.5. Tubérculos			
2.2. Cultivos permanentes		2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	
		2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	
		2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	
		2.2.4. Cultivos agroforestales	
		2.2.5. Cultivos confinados	

(.../...)

(.../...)

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
	2.3. Pastos	2.3.1. Pastos limpios 2.3.2. Pastos arbolados 2.3.3. Pastos enmalezados 2.3.4. Pastos degradados
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Mosaico de cultivos 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales 2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
3. Bosques y áreas seminaturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque denso
		3.1.2. Bosque abierto
		3.1.3. Bosque fragmentado
		3.1.4. Bosque de galería o ripario
		3.1.5. Plantación forestal
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal	
	3.2.2. Arbustal	
	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.1. Zonas arenosas naturales	
	3.3.2. Afloramientos rocosos	
	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	
	3.3.4. Zonas quemadas	
	3.3.5. Zonas glaciales y nivales	
4. Áreas húmedas	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Humedales y zonas pantanosas
		4.1.2. Turberas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpo de agua
5. Superficies de agua	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
		5.1.3. Canales - (vallados y acequias)
		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
5.2. Aguas marítimas	5.2.1. Lagunas costeras	5.2.1. Lagunas costeras
		5.2.2. Mares y océanos
		5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Fuente: adaptado de IDEAM (2010).

» **Tabla 3.15.** Leyenda para análisis de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	CODIFICACIÓN EN LA MATRIZ DE CAMBIOS
1. Territorios artificializados	1.1. Zonas urbanizadas		1
	1.2. Zonas Industriales o comerciales y redes de comunicación		2
	1.3. Zonas de extracción minera y escombreras		3
2. Territorios agrícolas	2.1. Cultivos transitorios		4
	2.2. Cultivos permanentes		5
	2.3. Pastos		6
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas		7
3. Bosques y áreas seminaturales	3.1. Bosques	3.1.1. Natural*	8
		3.1.2. Seminatural*	9
		3.1.5. Plantación forestal	10
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal	11
		3.2.2. Arbustal	12
		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	13
		3.3.2. Afloramientos rocosos	14
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	15
		3.3.4. Zonas quemadas	16
4. Áreas húmedas	4.1. Áreas húmedas continentales		17
5. Superficies de agua	5.1. Aguas continentales naturales		18
	5.2. Aguas continentales artificiales		19
	5.3. Aguas marítimas		20

Fuente: adaptado de la leyenda de Corine Land Cover propuesta por IDEAM (2010), y la leyenda de cobertura de la tierra utilizada para la estimación de la deforestación en Colombia presentada en el documento Cabrera et al. (2011).

La definición de la leyenda para análisis de susceptibilidad presentada en la Tabla 3.15 se encuentra detallada en la Tabla 2 del anexo 3.2.3.

### 3.2.3.2.2 Capa de usos del suelo actual (CUS-t1)

La elaboración de este mapa es de utilidad no solo para su uso en el análisis de susceptibilidad, sino también, como aporte al ordenamiento territorial de los municipios en el marco de los estudios de amenaza por movimientos en masa y aporte al análisis propio de la amenaza en relación con la dinámica antrópica; además es un insumo que de manera general puede aportar recomendaciones en relación con la estabilidad del territorio.

Se propone clasificar el uso por Grupo de uso y uso actual, el cual se relaciona con la unidad de cobertura de la tierra de acuerdo con la Tabla 3.16. Se complementa la definición de la unidad de uso del suelo para las unidades de coberturas que presentan una mayor dinámica antrópica, a partir del análisis de información secundaria relacionada con los diferentes usos actuales que puede tener un grupo de uso específico. Es decir, una unidad de pastos no siempre está directamente relacionada con el uso ganadería, en ciertas zonas se puede relacionar con tierras en descanso, por ejemplo; por tanto, el análisis de la información secundaria y la verificación de campo son importantes para definir el uso actual real del territorio.

» **Tabla 3.16.** Leyenda de usos del suelo

NIVEL I	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
1. Territorios artificializados	* Asentamiento	* Residencial
		* Comercial
	* Infraestructura	* Industrial
		*Infraestructura y transporte
		*Recreacional, deportivo o turístico
		* Transporte
	* Minería	*Materiales de construcción
		*Metales radiactivos
		* Minerales no metálicos
		* Minerales energéticos
*Piedras preciosas		
* Otros usos	* Disposición de materiales líquidos	
	*Disposición de materiales sólidos	
2. Territorios agrícolas	* Agricultura	* Cultivos transitorios intensivos
		* Cultivos transitorios semintensivos
		* Cultivo permanente intensivo
		* Cultivo permanente semi intensivo
	* Ganadería	* Pastoreo semi intensivo
		* Pastoreo intensivo
	* Otros usos	* Tierras en descanso
	* Agricultura	* Producción
	* Agroforestal	* Sistemas combinados de agricultura y forestería
	* Agrosilvopastoril	*Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería
* Agropecuario	*Cultivos permanentes semi-intensivos con pastoreo extensivo	
* Agrosilvopastoril	*Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería	
* Silvopastoril	*Sistemas combinados de ganadería y forestería	
3. Áreas naturales y seminaturales	* Conservación	*Protección
	* Conservación	* Protección
		* Producción - Protección
	* Forestal	* Sistema forestal productor (FPD)
		* Sistema forestal protector (FPR)
	* Conservación	* Protección
	* Otros usos	* Pastoreo
	* Conservación	* Producción
		* Protección
	* Agroforestal	* Producción - Protección
* Conservación	* Protección	
* Otros usos	* Tierras en descanso	
Otros usos	* Protección	
* Sin uso	* Sin uso	
* Otros usos	* Restauración	
	* Recuperación	

(…/…)

(…/…)

NIVEL I	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
	* Otros usos	* Tierras en descanso
4. Áreas húmedas	* Conservación	* Protección
	* Sin uso	* Protección
	* Cuerpos de agua naturales	* Cuerpos de agua naturales
5. Superficies de agua	* Cuerpos de agua artificiales	* Cuerpos de agua artificiales
		* Infraestructura

Fuente: adaptado de la metodología IGAC (2005b) e IDEAM (2010) por tipo de cobertura.

En la Tabla 2 del Anexo 3.2.3 se presenta la leyenda de cobertura de la tierra y su relación con el uso del suelo, y en la Tabla 1 del Anexo 3.2.3 se presenta el formato de campo de verificación de cobertura de la tierra y uso del suelo como complemento en la etapa de la recolección de la información en campo descrita anteriormente. Este formato es una propuesta que provee información para el análisis del componente, con la cual se pueden verificar las unidades interpretadas y generar patrones espaciales de la dinámica antrópica de la zona a estudiar.

### 3.2.3.2.3 Priorización de zonas por deforestación

La priorización de zonas por deforestación es una etapa de definición de las áreas en las cuales se va a realizar el análisis de cambios de la cobertura en el periodo de análisis multitemporal. Esta definición se obtiene a partir de las áreas de cambio y no cambio por deforestación, representando una de las muchas dinámicas antrópicas, de las cuales se tiene información espacial a nivel nacional en diferentes periodos de tiempo. Esta propuesta permite reducir las áreas en las cuales se van a definir los cambios de la cobertura de la tierra.

En esta etapa se realiza una priorización a partir de la comparación de mapas de cambio de Bosque y No bosque, los cuales fueron elaborados en el Proyecto “Capacidad Institucional, Técnica y Científica para Apoyar Proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación –REDD– en Colombia”, liderado por el IDEAM a escala 1:100.000; cuyos periodos de información son: 1990-2000, 2000-2005, 2005-2010, 2010-2012, 2012-2013 y 2012-2014, y que puede ser consultado en el siguiente link.

<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/deforestacion-colombia><sup>1</sup>.

Se debe utilizar la información del periodo en que se va a aplicar el análisis multitemporal, sin embargo, es útil revisar la totalidad de la información, para tener claridad a nivel general del patrón del cambio en la zona de estudio.

En la Tabla 3.17 se presentan las clases y grados de cambio de coberturas por deforestación, como criterio de delimitación y priorización de las áreas a interpretar para el tiempo anterior.

Los grados de cambio se relacionan con las áreas de mayor actividad o dinámica antrópica por diferentes tipos de usos y por incrementos en las dinámicas naturales. Un ejemplo de grado de cambio bajo se refiere a la permanencia de las unidades de cobertura de un tiempo a otro. Los grados de cambio alto son transformaciones que generan pérdidas de cobertura natural, producidas generalmente por una alta intervención antrópica relacionada directamente con deforestación. Para el caso del grado de cambio medio se presentan casos tales como la transformación de una unidad de mayor dinámica a una de menor actividad antrópica, o casi nula intervención del ser humano, incluye etapas de regeneración y no bosque estable.

Las unidades de no bosque hacen referencia a las áreas urbanizadas y otras áreas artificializadas, cultivos transitorios, cultivos permanentes, pastos, áreas agrícolas heterogéneas, plantación forestal, áreas con vegetación herbácea, áreas

<sup>1</sup> La información digital de deforestación está disponible en la subdirección de ecosistemas-grupo de bosques del Instituto de Hidrología y meteorología de Colombia – IDEAM.

con vegetación arbustiva, vegetación secundaria o en transición, zonas quemadas, otras áreas sin vegetación, vegetación acuática y superficies de agua, presentadas en la leyenda de cobertura de la tierra utilizada para la estimación de deforestación en Colombia (Cabrera et al., 2011).

Una vez se ha definido el grado de cambio, en las zonas de grado de cambio alto y medio se debe realizar el análisis multitemporal.

En las zonas sin información que equivalen a menos del 5% del territorio Nacional y se en-

cuentran ubicadas de forma dispersa, se sugiere que a criterio experto se defina su inclusión en el análisis multitemporal.

En relación con el grado de cambio bajo, se define como las zonas en las cuales no se lleva a cabo el análisis multitemporal.

En zonas de estudio con grados de cambio bajo en la cobertura en más del 15% del área total, es recomendable el procedimiento de priorización. De lo contrario se debe elaborar el análisis de cambios de cobertura en toda el área de estudio.

» **Tabla 3.17.** Clase de cambio por deforestación y priorización de las zonas para análisis multitemporal en la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.000

COBERTURA T1_IDEAM*	COBERTURA T2_IDEAM*	CLASE MAPA DE CAMBIO	GRADO DE CAMBIO_SGC	ACTIVIDAD
1 Bosque	1 Bosque	1 Bosque Estable	Bajo	Áreas de no implementación del análisis multitemporal
1 Bosque	2 No Bosque	2 Deforestación	Alta	Priorización de áreas para implementar análisis multitemporal de coberturas
1 Bosque	3 Sin Información	3 Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
2 No Bosque	1 Bosque	4 Regeneración	Medio	Priorización de áreas para implementar análisis multitemporal de coberturas
2 No Bosque	2 No Bosque	5 No Bosque Estable	Medio	
2 No Bosque	3 Sin Información	6 Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
3 Sin información	1 Bosque	7 Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
3 Sin Información	2 No Bosque	8 Sin Información	Sin Información	Criterio Experto
3 Sin Información	3 Sin Información	9 Sin Información	Sin Información	Criterio Experto

\* T1\_IDEAM y T2\_IDEAM corresponden a los periodos de análisis de los cambios de bosque y no bosque, con base en los mapas del proyecto de cuantificación de la deforestación liderado por el IDEAM.

Fuente: adaptado de la leyenda de Cabrera et al. (2011).

#### 3.2.3.2.4 Capa de cobertura de la tierra en un tiempo anterior (CCT-t0)

Con las áreas de priorización se definen los límites donde se va a llevar a cabo la interpretación de las unidades de cobertura de la tierra para el periodo en el tiempo anterior o tiempo cero (t0).

Esta actividad se realiza siguiendo los lineamientos metodológicos propuestos para la elaboración de la capa de cobertura de la tierra

CCT-t1. La leyenda que se utiliza es la de Tercer nivel Corine Land Cover (Adaptado de IDEAM, 2010) que se presentó en la Tabla 3.15. Se recomienda trabajar sobre la capa de cobertura de la tierra del tiempo actual y tenerla de base en la interpretación del tiempo cero para mantener un patrón geométrico y temático en la definición de unidades, ya sea porque se mantienen las unidades o porque han cambiado.

### 3.2.3.2.5 Multitemporal

Se realiza una comparación de diferentes años a partir de un análisis multitemporal de coberturas como mínimo en 2 tiempos con una diferencia máxima de 10 años. Sin embargo, en zonas donde se encuentre una mayor disponibilidad de imágenes para diferentes tiempos, se pueden incrementar los periodos de análisis con el objeto de evaluar la dinámica a largo plazo de un determinado cambio de la cobertura de la tierra y uso del suelo (Chuvieco, 1998) y su relación con la ocurrencia de movimientos en masa.

La multitemporalidad o la sobreposición de mapas temáticos de 2 fechas (t1 y t0) permite conocer los cambios de ocupación de coberturas, calcular su superficie y localizarlos, aunque no proporciona información detallada sobre procesos de cambio (Pérez et al., 2012).

Una vez se cuente con los 2 mapas de cobertura de la tierra, se deben generalizar y codificar las unidades de cobertura de tercer nivel de acuerdo con la leyenda descrita en la Tabla 3.15, para la posterior aplicación de la matriz de cambio que se presenta en la Tabla 3.18.

Para la aplicación de la matriz se recomienda el formato *raster* según el código de la unidad de cobertura. Debe tenerse en cuenta que el tamaño de celda sugerido para la escala 1:25.000 es 6,61 metros (Castro, 2014).

El análisis del cambio de cobertura con base en la matriz de tabulación cruzada se aplica mediante algebra de mapas y se combinan las capas de los periodos interpretados de la cobertura de la tierra, con el fin de obtener los resultados identificados en la matriz de cambios definida en la Tabla 3.18.

» **Tabla 3.18.** Matriz de cambios con las unidades de cobertura de la tierra utilizadas en zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000.

		COBERTURAS TIEMPO ACTUAL CCT - t1																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
COBERTURAS TIEMPO ANTERIOR CCT - t0	1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	101	111	121	131	141	151	161	171	181	191	201
	2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102	112	122	132	142	152	162	172	182	192	202
	3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103	113	123	133	143	153	163	173	183	193	203
	4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104	114	124	134	144	154	164	174	184	194	204
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195	205
	6	16	26	36	46	56	66	76	86	96	106	116	126	136	146	156	166	176	186	196	206
	7	17	27	37	47	57	67	77	87	97	107	117	127	137	147	157	167	177	187	197	207
	8	18	28	38	48	58	68	78	88	98	108	118	128	138	148	158	168	178	188	198	208
	9	19	29	39	49	59	69	79	89	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189	199	209
	10	110	210	310	410	510	610	710	810	910	1010	1110	1210	1310	1410	1510	1610	1710	1810	1910	2010
	11	111	211	311	411	511	611	711	811	911	1011	1111	1211	1311	1411	1511	1611	1711	1811	1911	2011
	12	112	212	312	412	512	612	712	812	912	1012	1112	1212	1312	1412	1512	1612	1712	1812	1912	2012
	13	113	213	313	413	513	613	713	813	913	1013	1113	1213	1313	1413	1513	1613	1713	1813	1913	2013
	14	114	214	314	414	514	614	714	814	914	1014	1114	1214	1314	1414	1514	1614	1714	1814	1914	2014
	15	115	215	315	415	515	615	715	815	915	1015	1115	1215	1315	1415	1515	1615	1715	1815	1915	2015
	16	116	216	316	416	516	616	716	816	916	1016	1116	1216	1316	1416	1516	1616	1716	1816	1916	2016
	17	117	217	317	417	517	617	717	817	917	1017	1117	1217	1317	1417	1517	1617	1717	1817	1917	2017
	18	118	218	318	418	518	618	718	818	918	1018	1118	1218	1318	1418	1518	1618	1718	1818	1918	2018
	19	119	219	319	419	519	619	719	819	919	1019	1119	1219	1319	1419	1519	1619	1719	1819	1919	2019
	20	120	220	320	420	520	620	720	820	920	1020	1120	1220	1320	1420	1520	1620	1720	1820	1920	2020

Fuente: autores.

Este análisis permite establecer los cambios de la cobertura, que pueden obtenerse de la siguiente manera:

- » Los valores de la matriz que se ubican en la parte superior e inferior de la diagonal principal representan los cambios de la cobertura de la tierra.
- » La matriz se utiliza de la siguiente manera: se ingresa por el código de la cobertura en el tiempo actual (columnas) y se intersecan con los códigos de la cobertura del tiempo anterior (filas). De esta forma se obtiene un código compuesto por dos números que indica el tipo y la relación de cambio. El comportamiento del cambio se interpreta desde el código de la capa de cobertura del tiempo anterior (filas) hacia el código de la capa de cobertura del tiempo actual (columnas). Por ejemplo, en la posición 6-8 de la matriz de cambios (columna 6-fila 8), se obtiene una transformación de bosques a pastos y el código respectivo de cambio es 68. Al observar el comportamiento del cambio, este se ubica en la triagonal inferior, representando una pérdida de vegetación; un código 86, por su parte, indica una ganancia de vegetación representada por su ubicación en la triagonal superior.

- » Las unidades de cobertura de la tierra que no cambian se ubican en la diagonal principal de la matriz de cambio.

Se obtiene la capa de cambios de la cobertura de la tierra, con el objetivo de generar las respectivas estadísticas de cambio donde se definan las pérdidas, las ganancias y las persistencias, resultado del estudio multitemporal.

### 3.2.3.2.6 Resultados y análisis

Como evaluación del cambio se cuantifica el cambio total (CT) de cada categoría en términos del porcentaje de área. El CT se define como la suma de las ganancias y las pérdidas:  $CT = P + G$  y se determinan los índices de persistencia propuestos por Braimoh (2006), los cuales sirven para evaluar las características de las zonas de persistencia en relación con las pérdidas y ganancias. El índice de ganancia a persistencia (GP) es calculado por:  $GP = G/P$ ; y el índice de pérdidas a persistencia (PP) es calculado por:  $PP = P/P$ .

Para la capa multitemporal se deben crear los atributos de tipo de cambio, comportamiento del cambio (cómo fue el cambio), índices de persistencia y superficie cubierta por los tipos de cambio, como se presenta en la Tabla 3.19 (Santana & Pineda, 2011).

» **Tabla 3.19.** Atributos del análisis multitemporal

CÓDIGO DEL CAMBIO	TIPO DE CAMBIO	COMPORTAMIENTO DEL CAMBIO	ÍNDICE DE GANANCIA A PERSISTENCIA	ÍNDICE DE PÉRDIDA A PERSISTENCIA	ÁREA (Ha)	SUPERFICIE CUBIERTA POR LOS TIPOS DE CAMBIO
	Pérdida / Ganancia / Persistencia. Pérdida: pérdida de la superficie de las coberturas entre t0 y t1; Ganancia: ganancia de superficie de las coberturas entre t0 y t1; Persistencia: superficie de las coberturas que permanece igual entre t0 y t1. (Santana & Pineda, 2011).	Descripción del cambio de una cobertura a otra.	Sirve para evaluar las características de las zonas estables en relación con las ganancias: $GP = Ganancia/P$ Persistencia.	Sirve para evaluar las características de las zonas estables en relación con las Pérdidas: $PP = Pérdida/P$ Persistencia.	Generación del área por polígono.	Es la proporción porcentual del área que representa el tipo de cambio.

Fuente: autores.

Finalmente se obtiene una capa que permite analizar la dinámica de uso del suelo y cobertura de la tierra, su distribución y el incremento o disminución que sufren las diferentes coberturas.

Para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, se utiliza la capa multitemporal según el campo tipo de cambio.

A nivel de resultados se recomienda presentar las estadísticas de las coberturas por época interpretada, estadísticas del uso del suelo, estadísticas de cambio, estadísticas de pérdida, ganancia y persistencia, estadísticas de cambio e índices de persistencia con el inventario de procesos morfodinámicos de movimientos en masa.

Se sugiere analizar los resultados obtenidos de esta propuesta con el inventario de procesos morfodinámicos, con el fin de determinar la importancia de este factor condicionante en la ocurrencia de los movimientos en masa, la cual depende de las particularidades de la zona de estudio y del criterio experto.

### 3.3 FACTORES DETONANTES

De acuerdo con Wieczorek (1996), los movimientos en masa pueden tener diferentes factores causales (geológicas, físicas, antrópicas) pero solo un detonante. Por definición un detonante es un estímulo externo tal como una lluvia intensa, un sismo, erupciones volcánicas, tormentas, etc., cuya respuesta casi inmediata es un movimiento en masa producto del rápido cambio en el estado de esfuerzos o disminución de la resistencia del material que conforma la ladera o talud. En algunos casos los movimientos en masa ocurren en circunstancias en que no es claro identificar cual fue el detonante, debido a que la variación de diferentes factores causales lleva a las laderas a fallar gradualmente. Los factores detonantes naturales más comunes tanto para análisis de estabilidad de taludes como para zonificación de amenazas son la lluvia y el sismo.

En análisis de amenazas a escala media la probabilidad temporal de ocurrencia de un movimiento en masa se puede relacionar directa-

mente con la probabilidad de ocurrencia de un detonante (lluvia o sismo) con una magnitud suficiente para causarlo. El principal inconveniente de este tipo de análisis es la posibilidad de contar con un inventario de movimientos en masa basados en eventos específicos que permita establecer relaciones entre la fecha de ocurrencia del detonante, la fecha de ocurrencia del movimiento en masa y las características de los movimientos en masa identificados.

Aunque en la normatividad vigente (Decreto 1807 de 2014) y en algunas publicaciones se define la actividad antrópica como un factor detonante, en esta guía se consideran detonantes aquellos que producen un cambio rápido en el estado de esfuerzos o disminución de la resistencia del material que conforma las laderas. La actividad antrópica se aborda desde la temática de cobertura de la tierra y uso del suelo y, por tanto, su relación con la probabilidad temporal se considera en el incremento anual de la frecuencia de los deslizamientos detonados por lluvias y sismos (Corominas & Moya, 2008).

La ocurrencia temporal de los deslizamientos normalmente se expresa en términos de la frecuencia, el periodo de retorno o la probabilidad de excedencia. A partir del cálculo de la frecuencia de los factores detonantes como lluvias y sismos, se puede obtener la probabilidad temporal de ocurrencia de un movimiento en masa con base en el conocimiento regional de los inventarios de movimientos en masa detonados por lluvias o sismos (Guzzetti et al., 1999).

En términos de la probabilidad temporal calculada a partir de la frecuencia del detonante lluvia, esta no se extrapola en términos de escenarios futuros por efectos del cambio climático debido a que el clima y los deslizamientos de tierra actúan superponiéndose a las escalas espaciales y temporales, lo que dificulta la evaluación de los impactos climáticos en los deslizamientos de tierra (Gariano & Guzzetti, 2016).

Para la zonificación de amenaza por movimientos en masa se ha incluido el análisis de detonantes lluvia y sismo para la caracterización de la probabilidad temporal de ocurrencia de un movimiento en masa, ligada a la probabilidad temporal de ocurrencia del detonante.

### 3.3.1 Lluvia

La respuesta de las laderas a una lluvia con capacidad de detonar un movimiento en masa depende del posible mecanismo de falla. Altas intensidades de lluvia frecuentemente detonan movimientos superficiales y flujos de detritos debido a que la disipación de las presiones de poros positivas es muy rápida, especialmente en materiales permeables. Lluvias de baja a moderada intensidad, que se presentan por días o semanas, pueden detonar flujos de detritos y deslizamientos profundos, siendo entonces importante la lluvia antecedente al reducir la succión del suelo e incrementar las presiones de poros positivas, especialmente en suelos de baja permeabilidad (Corominas et al., 2013).

La incidencia de la precipitación como detonante de movimientos en masa, ha sido involucrada en las evaluaciones de susceptibilidad, a partir de distribuciones espaciales del comporta-

miento promedio anual de la lluvia o de la lluvia máxima de 24 horas para un determinado periodo de retorno (Dahal et al., 2008). Autores como Guidicini e Iwasa (1977) basaron sus estudios en la lluvia antecedente al evento y la lluvia antecedente normalizada y otros han evaluado umbrales de lluvia como parte del diseño de sistemas de alerta temprana (Guzzetti et al., 2007; Crosta, 1990). Para Colombia se han establecido umbrales de lluvia como los calculados por Castellanos (1996), Moreno et al. (2006), Echeverri & Valencia (2004) y Ortiz et al. (1992).

En esta guía se aborda el cálculo de la probabilidad temporal de movimientos en masa detonados por lluvia en términos de periodos de retorno, frecuencias o probabilidades de excedencia, dirigidos a caracterizar cada categoría de susceptibilidad y se sugieren diferentes enfoques de acuerdo con el tipo de movimiento en masa y de la información disponible para tal fin, ver numeral 5.2.



### 3.3.2 Sismo

El movimiento del terreno durante la ocurrencia de un sismo ha sido un detonante importante de movimientos en masa en diferentes ambientes geológicos. Caídas de roca, deslizamientos de suelos y deslizamientos en roca en laderas escarpadas, involucrando capas superficiales de suelo y roca descompuesta, han sido los tipos de movimientos en masa más comunes detonados por sismos históricos (Wieczorek, 1996).

Para el análisis de sismos que detonan deslizamientos generalmente se usan datos de aceleración pico del terreno (PGA, por su sigla en inglés) que luego son considerados en modelaciones dinámicas o pseudoestáticas con análisis de equilibrio límite, que permiten obtener resultados cuantitativos en términos de la probabilidad de falla de un talud. Sin embargo, a escala media con otro tipo de métodos, el análisis de los sismos que detonan deslizamientos aún no está lo suficientemente desarrollado y constituye un campo de investigación aún en construcción debido a la dificultad implícita en definir los posibles escenarios de sismos, por ejemplo, con respecto a las condiciones de humedad antecedente y su asociación con distribuciones de movimientos en masa co-sísmicos (Corominas et al., 2013), por lo que se requiere ampliar el conocimiento sobre la relación entre sismos y deslizamientos a partir de la elaboración de inventarios de procesos co-sísmicos en diferentes ambientes.

Existen diferentes aproximaciones que han servido de base para establecer una posible rela-

ción entre la distribución de sismos que detonan movimientos en masa y las posibles áreas afectadas y tipos de procesos como las presentadas por Keefer (1984) y Rodríguez et al., (1999). Sin embargo, varios autores han demostrado que estas relaciones tienen una alta incertidumbre y no pueden validarse en cualquier zona de estudio (Tanyas et al., 2017), especialmente por el hecho de que el cálculo e identificación de la totalidad de movimientos en masa detonados por un sismo de determinada magnitud es altamente difícil. La literatura relacionada con los factores que condicionan la ocurrencia de un movimiento en masa detonado por un sismo es aún muy escasa, en parte porque se requiere del conocimiento y consideración de un amplio rango de condiciones tectónicas, geomorfológicas y climáticas para establecer patrones de distribución de movimientos en masa (Tanyas et al., 2017).

Considerando lo anterior, en esta metodología se propone una aproximación general de la probabilidad temporal de ocurrencia de un sismo con capacidad de detonar movimientos en masa, a partir de la revisión de registros de sismicidad relacionada con movimientos en masa disponibles en el SGC y la aplicación de las curvas teóricas presentadas por Rodríguez et al. (1999), con las cuales se pretende realizar un análisis general para toda el área de estudio. Como se mencionó, estas curvas tienen restricciones de aplicabilidad y deben ser usadas solo como un referente para este tipo de análisis.





4

# ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD



# | Capítulo 4 |

El análisis de susceptibilidad por movimientos en masa puede considerarse el primer paso para la zonificación de la amenaza y evaluación de riesgo. Un mapa de susceptibilidad contiene información sobre los tipos de movimientos en masa, áreas más probables para su ocurrencia e incluso áreas posiblemente afectadas. En estudios a escala media y zonas donde no existe suficiente información sobre la temporalidad de los movimientos en masa, el mapa de susceptibilidad puede considerarse en sí mismo un producto final que puede usarse directamente en la planificación territorial.

Los métodos más usados para el análisis de susceptibilidad se basan en la suposición de que las condiciones en que ocurrieron los movimientos en masa son indicativas de las condiciones en las cuales puedan ocurrir en el futuro. Este enfoque resalta la necesidad de disponer de inventarios de movimientos en masa completos antes de realizar cualquier análisis de susceptibilidad.

Existen diferentes métodos para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, cuya aplicación depende de aspectos tales como el tipo de movimiento en masa, el tamaño del área de estudio, la información disponible, la escala de análisis y el conocimiento de los expertos que ejecutan los estudios. Una completa revisión sobre los tipos de métodos disponibles para este tipo de análisis, requerimientos de información y ejemplos de aplicación, se puede consultar en Corominas et al. (2013).

Considerando el alcance de esta guía y la escala de trabajo, se recomienda para el análisis de susceptibilidad, tanto el mapeo directo, a partir de geoformas indicativas de inestabilidad, como el análisis estadístico de factores o combinación de factores condicionantes de la ocurrencia de movimientos en masa en el área de

estudio. En cualquiera de los casos la base para el análisis de susceptibilidad es un completo inventario de procesos morfodinámicos y el conocimiento que, a partir de este, se puede obtener, así como, capas de información cartográfica de calidad. Es importante resaltar que estos métodos no deben ser automatizados y dependen en gran medida del conocimiento experto del área de estudio (van Westen, 2013).

Idealmente en un análisis de susceptibilidad se deben identificar tanto las posibles zonas de ocurrencia del movimiento en masa (zonas o puntos de inicio), como aquellas que posiblemente serán afectadas por el alcance o distancia de viaje del movimiento. Dado que cada tipo de movimiento está caracterizado por unas condiciones específicas que determinan tanto las zonas donde este ocurrirá (inicio) como su alcance (distancia de viaje), se deben realizar análisis de susceptibilidad por tipo de movimiento de acuerdo con los escenarios que se puedan presentar en cada zona de estudio. Al final, se debe presentar un mapa en el cual se integre la susceptibilidad del terreno por todos los tipos de movimiento analizados.

En la Tabla 4.1 se presenta el enfoque recomendado en este documento para el análisis de susceptibilidad por tipo de movimiento de acuerdo con los grupos que se presentaron en el numeral 1.1.3.

En la Figura 4.1 se presenta un esquema de la metodología con la cual se propone construir el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa. Como primer paso se requiere la preparación de los factores condicionantes, tales como las unidades geológicas superficiales, las subunidades geomorfológicas, las unidades de cobertura de la tierra y uso del suelo y el inventario de procesos morfodinámicos. Una vez se tenga el in-

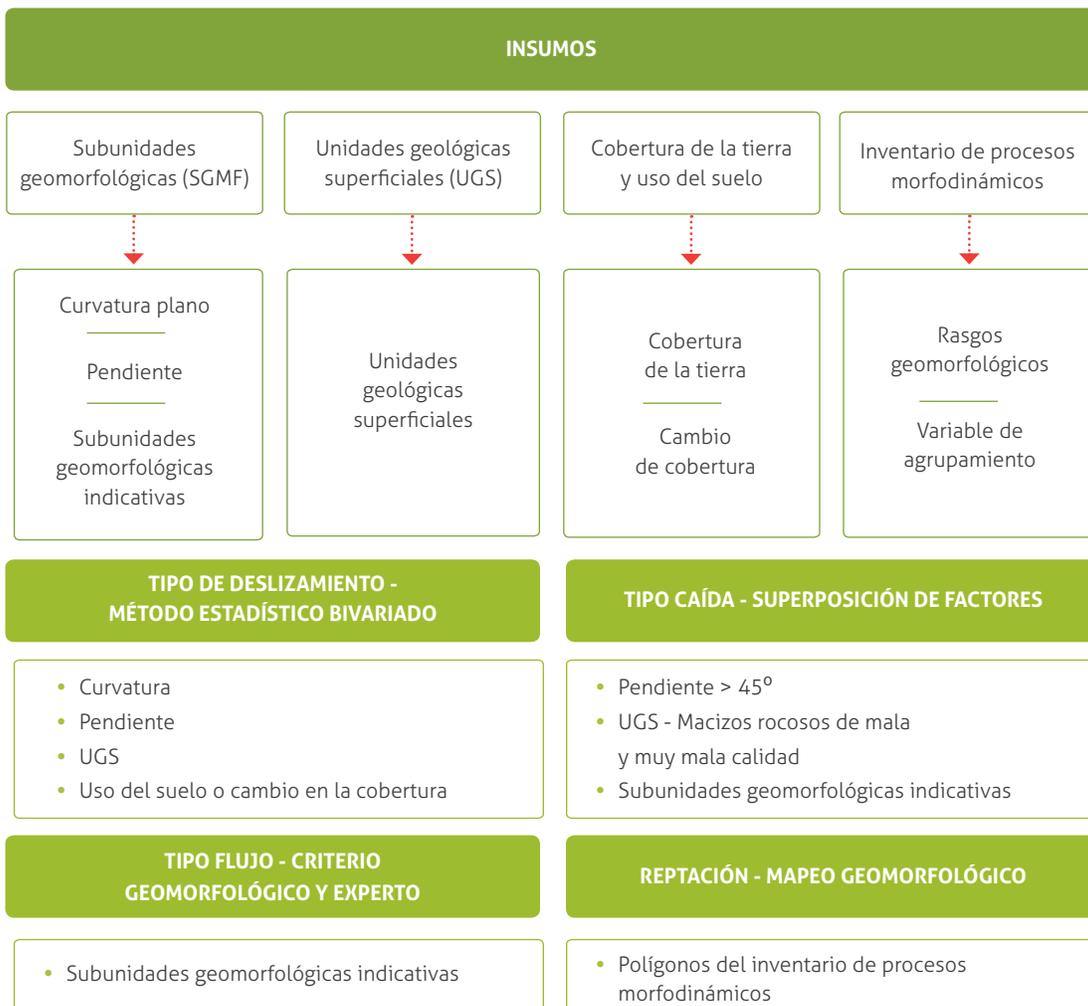
ventario de procesos se genera la variable de con la cual se aplica el método estadístico, de acuerdo con los lineamientos descritos en los siguientes numerales, para los movimientos en masa tipo deslizamientos, y se debe elaborar una curva de

éxito para validar el ajuste de los resultados y obtener así las categorías finales de susceptibilidad. Para movimientos en masa tipo caída y flujo se integran las subunidades geomorfológicas con el análisis del inventario de procesos.

» **Tabla 4.1.** Métodos de análisis propuesto para cada tipo de movimiento en masa

TIPO	MÉTODO	ZONA DE ANÁLISIS
Deslizamientos	Estadístico bivariado (Pesos de evidencia - WofE)	Zonas de inicio y depósito
Caídas	Criterios geológicos y geomorfológicos	Zonas de inicio y depósito
Flujos	Mapeo geomorfológico	Zonas de depósito
Reptación	Identificación en el inventario	Zona de afectación directa

Fuente: autores.



» **Figura 4.1.** Esquema metodológico para el análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa

Fuente: autores.

Los métodos sugeridos en esta guía no restringen la posibilidad de usar otro tipo de técnicas y análisis más rigurosos de acuerdo con la información disponible y el conocimiento experto del área de estudio. Por otra parte, los escenarios y técnicas de análisis por tipo de movimiento dependerán del marco geológico y ambiental que determine las particularidades del área de estudio y su relación con un determinado movimiento en masa, que en este documento se ha denominado hipótesis de falla. Los factores o combinación de factores que determinan la ocurrencia de un tipo movimiento no son los mismos para todos los tipos de movimiento que se pueden presentar.

Dependiendo del área de estudio no necesariamente todos los tipos de movimiento en masa serán analizados. En el caso en que el inventario de procesos esté compuesto en más del 90% por un solo tipo o subtipo de movimiento en masa, será suficiente realizar el análisis de susceptibilidad y amenaza solo por ese tipo de proceso. Para el caso de flujos clasificados como avenida torrencial no aplica esta condición, dado que, por la magnitud y capacidad de afectación de estos procesos, se deben siempre analizar cuando sea un escenario de amenaza posible (basado en criterios geomorfológicos e históricos de afectación).

## 4.1 LA UNIDAD DE ANÁLISIS

Dado que la metodología propuesta está basada en el uso de herramientas SIG, es necesario establecer una unidad de análisis que permita cierto grado de control sobre algunos de los procesos que se aplican.

Una unidad de análisis se define como un área que contiene un conjunto de condiciones comunes que difieren de las unidades adyacentes y tiene límites específicos (Hansen, 1984). Entre las unidades de análisis que se han propuesto para análisis de amenaza por movimientos en masa, Meijerink (1988) y Carrara et al. (1995) mencionan la celda o pixel, unidades de terreno, unidades de condición única (UCU), unidades de ladera y unidades topográficas como las más importantes.

Se propone en esta guía el uso de la celda o pixel (formato raster), teniendo en cuenta que el modelo digital de elevación es una matriz regular de pixeles o celdas que permite la generación de todas las variables geométricas, cumple con las condiciones expuestas por Hansen (1984) y a cada pixel se le pueden asociar atributos cualitativos o cuantitativos que permiten un manejo más liviano en una plataforma SIG.

## 4.2 ALISTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Con el fin de acondicionar los insumos necesarios para la aplicación de la metodología de zonificación, es necesario empezar con una etapa de alistamiento de la información, en la cual se deben cumplir los siguientes procesos:

- » Todas las capas vectores deberán estar corregidas topológicamente, de forma que no generen conflictos cuando sea necesario su conversión a raster.
- » Todas las capas vectores deberán ser convertidas a raster teniendo en cuenta la resolución espacial y área de estudio del modelo digital de elevación seleccionado.
- » La capa de Subunidades Geomorfológicas se deberá rasterizar por subunidad definida.
- » La capa de UGS se deberá rasterizar por unidad definida.
- » La capa de uso del suelo se deberá rasterizar de acuerdo con el grupo de uso (Tabla 3.16).
- » La capa de cambio de la cobertura se deberá rasterizar de acuerdo con el tipo de cambio (Tabla 3.19).
- » La capa de pendientes se debe obtener a partir del modelo digital de elevaciones teniendo en cuenta las clases designadas en el numeral 3.2.1.2.1.
- » La capa de curvatura plano se deberá generar a partir del modelo digital de elevación teniendo en cuenta las categorías designadas en el numeral 3.2.1.2.2.

Todas las capas de información deberán cumplir las especificaciones presentadas en el capítulo dos. El tamaño de pixel recomendado

para el formato ráster de las capas es el mismo del DEM a partir del cual se generaron las variables geométricas, siempre buscando coherencia entre los análisis estadísticos de áreas de los movimientos en masa cartografiados y el tamaño de celda.

De acuerdo con la experiencia del SGC en la aplicación de estas metodologías, antes de iniciar con el análisis de susceptibilidad es importante revisar la posible relación que puede existir entre las unidades de diferentes capas temáticas, con el fin de verificar la presencia de polígonos que representan las mismas características y por lo tanto deben conservar la misma topología. Un ejemplo de estas relaciones temáticas se presenta en el anexo 4.1.

### 4.3 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO DESLIZAMIENTO

Para el análisis de susceptibilidad por deslizamientos se recomienda la aplicación del método estadístico bivariado WofE, cuyas principales características serán presentadas en los siguientes numerales. Es importante resaltar que los resultados obtenidos con este método brindan un soporte para la validación de las hipótesis planteadas sobre los factores condicionantes más importantes para la ocurrencia de los movimientos en masa en un área de estudio, las cuales son elaboradas a partir del análisis del inventario de movimientos en masa y el conocimiento experto. Estos resultados se pueden tomar como válidos solo en el caso en que sean coherentes con respecto a las características que definen cada área y que la calidad de los datos con que se cuente sea suficiente. En cualquier caso, el criterio experto es la base para la validación de los análisis y sus resultados.

#### 4.3.1 Pesos de Evidencia (Weight of Evidence, WofE)

Este método evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos. El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesia-

no que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa (Bonham, 1994). La probabilidad incondicional (previa) se calcula con los mismos tipos de movimientos en masa que ocurrieron en el pasado en un periodo determinado y puede ser modificada de modo que al agregar una nueva evidencia la probabilidad cambia y se genera entonces una probabilidad (condicionada) llamada probabilidad posterior (Bonham, 1994). La probabilidad posterior se calcula sumando los pesos de cada factor en una función aditiva. Por cada mecanismo analizado se puede generar una función de probabilidad.

La aplicación de este método está sujeta a ciertas condiciones que deben tenerse en cuenta al momento de interpretar los resultados obtenidos.

De acuerdo con van Westen (2013), en un análisis estadístico efectivo se requiere un gran número de zonas inestables relacionadas con varios tipos de mecanismos con una información de edad lo más fiel posible. Para escala 1:25.000, se recomienda la combinación del método estadístico junto con el enfoque ponderado basado en criterio experto.

Las siguientes se pueden considerar ventajas del método:

- » El método es objetivo y evita la subjetividad de elegir los pesos de los factores, como en los métodos semicuantitativos.
- » La relación entre el factor condicionante y los movimientos en masa se evalúa con bases estadísticas.
- » Replicabilidad y control del proceso de zonificación final.
- » Control de la capacidad de predicción del modelo.

Las siguientes se pueden considerar desventajas del método:

- » El método asume que los movimientos en masa ocurren debido a la misma combinación de factores en toda el área de estudio.
- » El método requiere de criterio experto en la selección de los factores condicionantes relacionados con las hipótesis de falla planteadas.

- » El método es sensible a exigencias como errores de mapeo, completitud del inventario, resolución de los datos y unidad de terreno considerada.
- » Los pesos de evidencia no son siempre aplicables en regiones poco conocidas y si es utilizado con una pequeña muestra de ocurrencias de procesos conocidos, los resultados deben ser interpretados con cuidado (García, 2008).
- » El método asume que los factores son condicionalmente independientes unos de otros y por lo tanto se deberían comprobar.
- » Los mapas obtenidos no se pueden verificar mediante una solución analítica.

En cuanto al desarrollo matemático, en Bonham (1994) se asume que el deslizamiento  $L$  ha sucedido en un área  $p$  veces; si el área total es  $q$ , entonces se puede decir que la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento es:

$$p(L) = \frac{n(L)}{q} = \frac{p}{q} \tag{Ecuación 4.1}$$

Donde  $n$  representa el número de veces que se repite  $L$ ; si  $w_i$  representa un factor condicionante donde se tienen clases de  $i = 1 \dots m$  entonces:

$$p(L|w_i) = \frac{p(w_i \cap L)}{p(w_i)} \tag{Ecuación 4.2}$$

Si se expresa la ecuación anterior en función de las proporciones en lugar de la probabilidad, se tiene que:

$$O(L) = \frac{p(L)}{p(L)} = \frac{p(L)}{1-p(L)} = \frac{p}{q-p} \tag{Ecuación 4.3}$$

$$O(L|w_i) = \frac{p(L|w_i)}{p(L|w_i)} \tag{Ecuación 4.4}$$

Por lo tanto, se llamará pesos de evidencia a las siguientes ecuaciones:

$$W_i^+ = \ln \frac{p(w_i|L)}{p(w_i|\bar{L})} \tag{Ecuación 4.5}$$

$$W_i^- = \ln \frac{p(\bar{w}_i|L)}{p(\bar{w}_i|\bar{L})} \tag{Ecuación 4.6}$$

El detalle de esta formulación matemática se presenta en Bonham (1994).

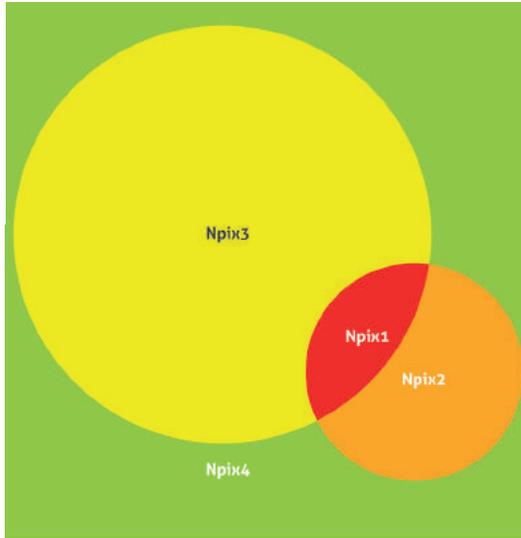
Van Westen (1993) plantea que en términos de píxeles el área  $q$  está compuesta por un número total de píxeles  $N = Npix1 + Npix2 + Npix3 + Npix4$ , y que se cumplen las relaciones presentadas en la Tabla 4.2.

» **Tabla 4.2.** Relación deslizamientos  $L$  y factor condicionante  $w$

		w: Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L: Deslizamientos	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad w	Área total sin unidad w	Área total del mapa

Fuente: autores.

En términos gráficos la relación deslizamiento y factor condicionante se muestra en la Figura 4.2.



» **Figura 4.2.** Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante

Fuente: autores.

Lo anterior se puede interpretar de la siguiente forma:

$Npix1$  = hay presencia del factor condicionante ( $Npix3$ ) en el deslizamiento ( $Npix2$ ). Lo cual es indicativo de una muy alta significancia de ese factor en el deslizamiento.

$Npix2$  = no hay presencia del factor condicionante ( $Npix3$ ) en el deslizamiento ( $Npix2$ ). Lo cual es indicativo de una significancia alta por efecto de la presencia del deslizamiento.

$Npix3$  = factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia media por efecto del factor que alguna vez contribuyó al deslizamiento.

$Npix4$  = no hay deslizamiento ni factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia baja.

Y los pesos se pueden expresar en términos de pixeles como:

Para el peso positivo:

$$W_i^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}} \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Donde el peso positivo indica la importancia de la presencia del factor en el deslizamiento de la siguiente forma:

$W_i^+ > 0$ : Positivo, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación directa o el grado de contribución.

$W_i^+ < 0$ : Negativo, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación inversa.

$W_i^+ = 0$ : Indica que el factor no es relevante.

Para el peso negativo:

$$W_i^- = \ln \frac{\frac{Npix2}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Donde el peso negativo indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento de la siguiente forma:

$W_i^- > 0$ : Positivo, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento.

$W_i^- < 0$ : Negativo, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento.

$W_i^- = 0$ : Indica que el factor no es relevante.

Los pesos de evidencia  $W_i^+$  y  $W_i^-$  se deberán calcular para cada clase del factor.

En la Ecuación 4.9 se define el contraste o peso final  $W_f$ , el cual da una medida de correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa. El peso final  $W_f$  será cero cuando la distribución espacial de los movi-

mientos en masa es independiente del factor considerado, es positivo cuando existe una asociación positiva (la presencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa) y negativo cuando existe una asociación negativa (la ausencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa).

$$W_f = W_i^+ - W_i^-$$

(Ecuación 4.9)

Con el fin de presentar un ejemplo de cálculo usando el método WofE, en la Tabla 4.3 se muestran los resultados de su aplicación en el municipio de Popayán, Cauca (SGC, 2015b), tomando como factor condicionante la capa de pendiente del terreno. En estas tablas se relacionan los datos obtenidos de la superposición de los movimientos en masa con las clases del factor condicionante, se calculan las estadísticas, los pesos positivos y negativos, las densidades del método y los pesos finales o contraste.

» **Tabla 4.3.** Pesos finales para la variable pendiente aplicando el método WofE en el estudio de *Zonificación de la Amenaza por movimientos en masa, municipio de Popayán, departamento del Cauca*

1	2	3	4	5	6	7	8
Categoría	Mov	% Mov	Clase	% Clase	wi+	wi-	wf
0°-6°	750	4,0730	989781	20,692	-1,628480028	0,191061552	-1,81954158
6°-12°	2733	14,8420	1168410	24,427	-0,499729686	0,119894794	-0,61962448
12°-18°	4668	25,3503	1097656	22,947	0,099987925	-0,031801453	0,131789378
18°-24°	4531	24,6063	739939	15,469	0,466444939	-0,11481124	0,581256179
24°-30°	2799	15,2004	403743	8,441	0,591368164	-0,076982345	0,668350509
30°-36°	1638	8,8954	221844	4,638	0,654840234	-0,045846145	0,700686379
>36°	1295	7,0327	161975	3,386	0,735023606	-0,03861926	0,773642866
Total	18414		4783348				

Fuente: SGC (2015b).

Para la tabla se hacen las siguientes observaciones:

- » Las cantidades de la tabla se expresan en número de píxeles.
- » El tamaño del píxel utilizado en los cálculos fue de 10 x 10 m.
- » El área deslizada fue de 1,8 km<sup>2</sup>.
- » El área de estudio fue de 478 km<sup>2</sup>.
- » En la columna 1 se presentan las categorías de pendiente en grados.
- » En la columna 2 se presenta el número de píxeles con deslizamientos que corresponden a cada clase del factor pendiente.
- » En la columna 3 se presenta el porcentaje de deslizamientos correspondiente a cada clase del factor pendiente.
- » En la columna 4 se presenta el número de píxeles correspondiente a cada clase del factor pendiente.

- » En la columna 5 se presenta el porcentaje de cada clase del factor pendiente.
- » En la columna 6 se presenta los valores para el peso positivo aplicando WofE.
- » En la columna 7 se presenta los valores para el peso negativo aplicando WofE.
- » En la columna 8 se presenta el peso final o contraste.

### 4.3.2 Aplicación de la metodología

En la Figura 4.3 se presenta un esquema de la metodología propuesta para el análisis de susceptibilidad para movimientos en masa tipo deslizamiento. Una vez que se han definido los factores condicionantes y se ha alistado la información de las capas temáticas consideradas, es necesaria la definición de la variable de agrupamiento (numeral 4.3.2.2) para posteriormente combinarla con cada uno de los factores

condicionantes. El resultado de la combinación es una tabla de atributos que muestra el número (o área) de deslizamientos para cada clase del factor considerado. Esta tabla se puede manejar como hoja de cálculo para facilitar el manejo y la aplicación del método WofE. Estos pesos se calculan por cada uno de los factores propuestos definidos. La magnitud del peso indica la significancia del factor en la ecuación final y se deberá evaluar según lo expuesto en el numeral 4.3.1.

En la Ecuación 4.10 se presenta la función final de susceptibilidad o *LSI* (*landslide susceptibility index*, por sus siglas en inglés). El valor *LSI* de cada pixel corresponde a la suma de los pesos finales (Ecuación 4.9) calculados para la clase a la que pertenece el pixel de cada uno de los factores seleccionados.

$$LSI = W_f \text{Pendiente} + W_f \text{Curvatura} + W_f \text{UGS} + \dots W_f \text{Uso del suelo}$$

(Ecuación 4.10)

La evaluación de la calidad de esta función se hace a través de la construcción de una curva de éxito como se verá en los siguientes numerales.

#### 4.3.2.1 Hipótesis de falla

El análisis del aporte de cada factor o combinación de factores en la ocurrencia de un movimiento en masa de un tipo específico debe estar basado en hipótesis definidas a partir del análisis del inventario de procesos morfodinámicos, criterio experto y conocimiento del área de estudio. La aplicación del método estadístico propuesto sirve como una herramienta que orienta y permite comprobar las hipótesis planteadas sobre los factores que condicionan la ocurrencia de un movimiento en masa, pero su resultado se debe analizar en función de las características geoambientales y la coherencia de los resultados obtenidos. El objetivo es encontrar una combinación de factores que en la función final de susceptibilidad tengan los pesos con más significancia, tratando de explicar cuáles son o serán las causas de ocurrencia de un movimiento en masa. Estas hipótesis de falla deben proponerse para cada tipo de movimiento en masa, de forma que al final las combinaciones de factores pueden diferir para cada proceso analizado.

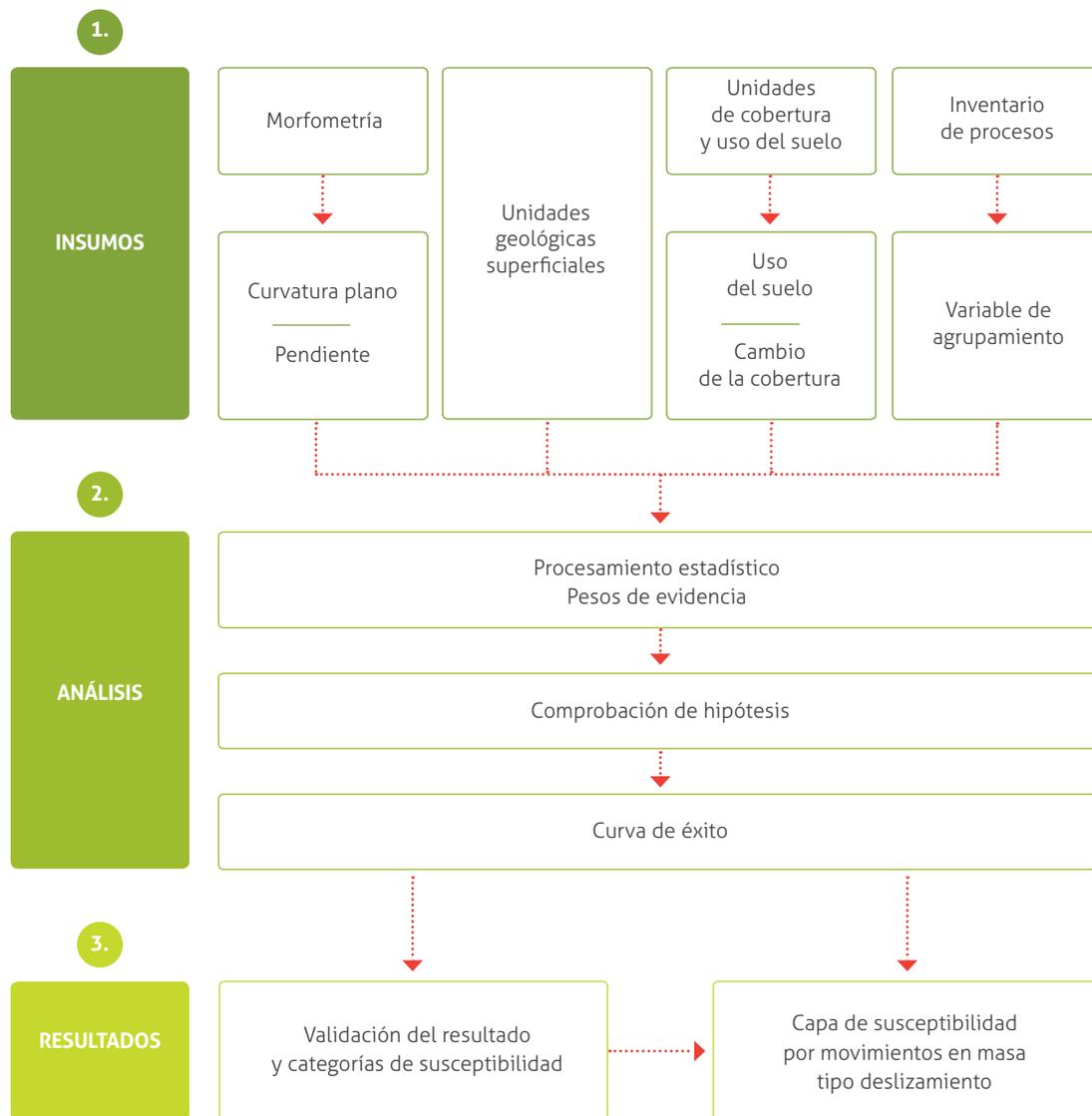
#### 4.3.2.2 Variable de agrupamiento

La variable de agrupamiento se define con la existencia de zonas inestables establecidas en el inventario de procesos morfodinámicos (polígonos del inventario) y permite establecer una relación estadística con los factores condicionantes para la comprobación de las hipótesis de falla.

La variable de agrupamiento debe considerar el objetivo del análisis y puede definirse con base en el polígono que representa cada movimiento en masa o con los polígonos que definen cada parte del movimiento (zona de inicio y depósito). En esta metodología se propone considerar el polígono que representa la totalidad del movimiento en masa. Sin embargo, si los resultados no satisfacen las hipótesis y difícilmente permiten explicar la ocurrencia de un tipo de movimiento en masa, se puede considerar definir la variable de agrupamiento con base solo en áreas de inicio o solo en áreas de depósito, con el fin de establecer de manera diferenciada la susceptibilidad del terreno al inicio de un deslizamiento, o la susceptibilidad de ser afectada por el depósito de un deslizamiento.

Esta variable agrupa todos los polígonos de los movimientos en masa tipo deslizamiento definidos en el capítulo uno. Para las operaciones de análisis espacial, se propone rasterizar los polígonos (vectores) de acuerdo con el campo TIPO\_MOVI de la Tabla 3.4. En el caso en que se quieran definir variables para comprobar hipótesis relacionadas con subtipos de movimiento, profundidad, zonas de inicio, zonas de depósito, entre otros, se pueden obtener diferentes variables de agrupamiento con base en los demás atributos del inventario de procesos morfodinámicos, las cuales pueden ser también combinadas con los factores condicionantes que se definan según las hipótesis de falla.

En la aplicación del método WofE se puede seleccionar una muestra de entrenamiento con la cual se calculan los pesos de cada factor que definen la función final que representa la susceptibilidad del área de estudio. Esta muestra depende del número de movimientos en masa que se tengan y puede corresponder al 60 o 70% de los movimientos inventariados (Conforti et al., 2012). Con los movimientos en masa que definen la función final se establece el ajuste



» **Figura 4.3.** Modelo conceptual para el cálculo de la capa de susceptibilidad por deslizamientos

Fuente: autores.

mediante la curva de éxito que se describe a continuación. El porcentaje de movimientos en masa restante se puede utilizar para la construcción de la curva de validación, con la cual se verifica la potencialidad de la función para pronosticar la ocurrencia de movimientos en masa. La elección de las muestras de entrenamiento y validación se puede basar en criterios espaciales, temporales o puede ser aleatoria. Por ejemplo, para definir la muestra de entrenamiento se pueden utilizar los movimientos en masa de un inventario geomorfológico y para validación los movimientos en masa de un inventario basado

en eventos; la elección depende de la disponibilidad de información y suficiencia de datos. En el caso en que no se tengan suficientes datos, será necesario tomar todos los polígonos del inventario para definir la función de susceptibilidad y la construcción de la curva de éxito. En estos casos no se puede construir una curva de validación.

#### 4.3.2.3 Curva de éxito y validación

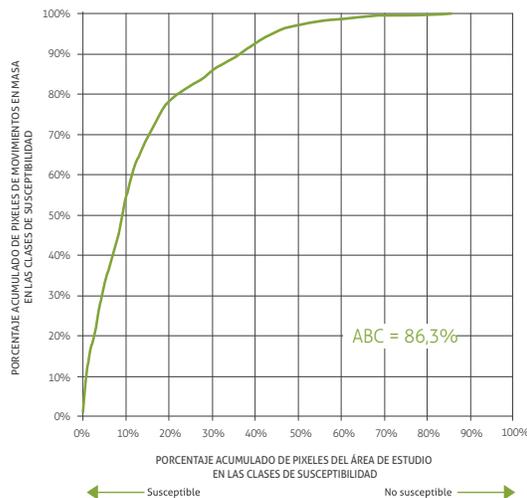
La curva de éxito mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados y para su construcción se deben ordenar los valores de la *LSI* en orden des-

cidente y dividirlos en percentiles de 100 categorías (Dahal et al., 2008). Cada grupo de 1% se deberá cruzar con la variable de agrupamiento para determinar con cuántos píxeles de la variable tiene relación.

Para la elaboración de la curva de éxito se trazan en el eje *X* los grupos percentiles del *LSI* de menor a mayor cada 1%, de forma que a la izquierda se ubique el percentil 1 (susceptible), a la derecha el percentil 100 (no susceptible) y en el eje *Y* se ubican los valores porcentuales cada 1% de los movimientos en masa correspondientes con el percentil del *LSI* (Blahut et al., 2010). En este caso se debe usar la muestra de entrenamiento del inventario de procesos. Esta curva se construye en términos del área total de la zona de estudio y el área total de los movimientos en masa considerados (Figura 4.4).

Una vez que la curva esté construida se deberá evaluar el área bajo la curva (ABC), para establecer la calidad de ajuste de los datos. Cuanto más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el ABC, mejor será la capacidad de la función para describir la distribución de los movimientos en masa. Un porcentaje aceptable de ajuste debe ser mayor a 70%.

En caso de contar con muestra de validación, se puede construir una curva siguiendo los pasos descritos anteriormente y superponerla con la curva de éxito para analizar el comportamiento de la función, tanto para describir la ocurrencia



» **Figura 4.4.** Ejemplo de una curva de éxito

Fuente: tomado de SGC (2017b).

de movimientos existentes como para el pronóstico de nuevos procesos.

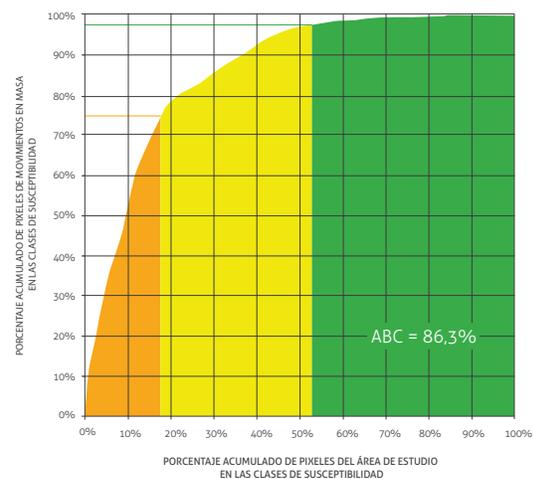
En el caso en que se cuente con muestra de validación, se puede construir una curva siguiendo los pasos descritos anteriormente y superponerla con la curva de éxito para analizar el comportamiento de la función, tanto para describir la ocurrencia de movimientos existentes como para el pronóstico de nuevos procesos.

Se debe tener en cuenta que las categorías de susceptibilidad se deben definir una vez se ha comprobado que la función de susceptibilidad definida representa las condiciones del área de estudio de forma adecuada y satisfactoria.

#### 4.3.2.4 Validación de resultados y categorías de susceptibilidad

Una vez que la función se haya ajustado con la muestra de entrenamiento, se puede construir la curva de validación como se explicó en el numeral anterior. Es importante documentar y presentar un análisis del grado de ajuste de la función de susceptibilidad y establecer las causas por las cuales la función explica o no las hipótesis de falla propuestas, con base en los datos estadísticos que se han obtenido de la aplicación del método WofE. La validación de la función tiene una componente importante de criterio geomorfológico y conocimiento experto.

Como se presenta en la Figura 4.5, a partir de la curva de éxito se pueden establecer las categorías



» **Figura 4.5.** Ejemplo de curva de éxito categorizada

Fuente: tomado de SGC (2017b).



de susceptibilidad con los siguientes criterios tomados de van Westen (2013). La categoría de susceptibilidad alta:

- » Tiene la mayor área acumulada de deslizamientos.
- » Tiene el mayor número de deslizamientos.
- » Tiene la mayor densidad de deslizamiento en porcentaje.
- » Tiene la mayor densidad de deslizamientos por unidad de área.
- » Las áreas de esta categoría deben ser lo más pequeñas posibles y limitarse a aquellas zonas donde se han producido deslizamientos y es más probable que se produzcan en el futuro.

La categoría de susceptibilidad media debe cumplir que:

- » Son áreas que presentan baja densidad de deslizamientos aunque eventualmente se pueden presentar.

La categoría de susceptibilidad baja debe cumplir que:

- » Son áreas donde se espera una muy baja densidad de ocurrencia de deslizamientos.

Se propone la siguiente categorización para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento (van Westen, 2013):

- » Susceptibilidad Alta: porcentaje de todos los movimientos en masa > 75%.
- » Susceptibilidad Media: porcentaje de todos los movimientos en masa hasta máximo 25%.
- » Susceptibilidad Baja: porcentaje de todos los movimientos en masa < 2%.

#### 4.4 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO CAÍDA

Para el análisis de movimientos en masa tipo caída a escala 1:25.000 se ha propuesto un método empírico basado en subunidades geomorfológicas indicativas de inestabilidad, definidas a partir

de mapeo directo. Es importante tener en cuenta que esta primera aproximación puede ser complementada con caracterización geomecánica del macizo, análisis cinemáticos y análisis de estabilidad por equilibrio límite, en el caso en que se requieran evaluaciones más rigurosas de este tipo de movimientos en masa, como por ejemplo si se tienen elementos expuestos. Consideraciones relacionadas con trayectorias de viaje de bloques, energía potencial y cinética no hacen parte del alcance de esta propuesta.

Como se presentó en el capítulo tres, se han definido algunas subunidades geomorfológicas indicativas de inestabilidad por movimientos tipo caída, las cuales serán la base para el análisis de susceptibilidad. Con el fin de integrar características topográficas y el estado de los macizos rocosos, se deben tomar algunos de los datos generados tanto en la temática de UGS como del DEM para la aplicación de los criterios propuestos para el análisis de susceptibilidad. Estos criterios pueden ser ajustados o modificados de acuerdo con las particularidades del área de estudio y con base en la información obtenida del inventario de procesos.

El análisis de susceptibilidad se compone de:

1. Identificación de posibles áreas fuente o zonas de inicio
2. Identificación de posibles zonas de depósito

Para la identificación de las áreas fuente se propone superponer las siguientes capas de información:

- » Laderas muy escarpadas (> 45° de inclinación)
- » Subunidades geomorfológicas indicativas (presentadas en el capítulo tres)
- » Unidades de roca (del mapa de UGS)

Dado que los movimientos tipo caída se producen comúnmente en unidades morfológicas muy escarpadas (Michoud et al., 2012), se ha establecido como umbral mínimo para análisis de susceptibilidad la inclinación del terreno igual o superior a 45°. Sin embargo, si los datos del inventario indican umbrales mayores en algunos materiales y condiciones específicas, estos pueden ser considerados en el análisis. De igual forma con las subunidades geomorfológicas in-

dicativas, las cuales se pueden complementar con otras que se consideren directamente relacionadas con este tipo de procesos en diferentes ambientes geológicos.

Una vez realizada la superposición de los datos se propone aplicar la siguiente tabla para la categorización de la susceptibilidad por zonas de inicio o áreas fuente (Tabla 4.4):

Para la identificación de posibles zonas de depósito se deben extraer los polígonos de de-

pósito de caídas del inventario de procesos y las zonas de inicio del mapa de subunidades geomorfológicas, y categorizar la zona de estudio como se presenta en la Tabla 4.5.

El mapa de susceptibilidad final por movimientos en masa tipo caída se elabora a partir de la combinación de los mapas de susceptibilidad por zonas de inicio y de depósito, de acuerdo con la Tabla 4.6.

» **Tabla 4.4.** Categorización de la susceptibilidad por zonas de inicio de movimientos en masa tipo caída

CLASE O CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN DE LOS CRITERIOS
<b>ALTA</b>	Zonas con pendientes mayores a 45° Presencia de subunidades geomorfológicas indicativas Macizos rocosos de mala y muy mala calidad
<b>MEDIA</b>	Zonas con pendientes mayores a 45° Presencia de subunidades geomorfológicas indicativas Macizos rocosos de regular calidad
<b>BAJA</b>	Zonas con pendientes menores a 45° No se encuentran subunidades geomorfológicas indicativas Macizos rocosos de buena y muy buena calidad

Fuente: autores.

» **Tabla 4.5.** Categorización de la susceptibilidad por zonas de depósito de movimientos tipo caída

CLASE O CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	DESCRIPCIÓN DEL CRITERIO
<b>ALTA</b>	Evidencias de zonas de depósito de procesos recientes
<b>MEDIA</b>	Evidencias geomorfológicas de zonas de depósito antiguas
<b>BAJA</b>	No hay evidencias geomorfológicas o registros de inventario de zonas de depósito de rocas por movimientos tipo caída

Fuente: autores.

» **Tabla 4.6.** Matriz para la categorización de la susceptibilidad por movimientos tipo caída

		Susceptibilidad por zona de inicio o fuente		
		Baja	Media	Alta
Susceptibilidad por zona depósito	Baja	Baja	Media	Alta
	Media	Media	Media	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: adaptada de van Westen (2013).

Debe tenerse en cuenta que los criterios aquí presentados para el análisis de susceptibilidad de las zonas de inicio y depósito por procesos tipo caída tienen un alto componente de subjetividad y la metodología propuesta depende en gran medida del mapeo geomorfológico. Esto implica un adecuado conocimiento de la zona de estudio, criterio experto y posiblemente un ajuste a los criterios inicialmente propuestos de acuerdo con los resultados obtenidos.

En cualquier caso, las categorías de susceptibilidad alta, media y baja deben cumplir con los criterios presentados en el numeral 4.3.2.4, para el número de procesos por categoría de susceptibilidad. En este caso también puede construirse una curva de éxito en función del área de cada categoría y el área o número de procesos inventariados.

Es conveniente a juicio del experto validar los criterios propuestos para el análisis de las zonas de depósito con métodos analíticos como el de la “línea de energía” presentado por Heim (1932, citado por Mavrouli et al., 2014), el cual se basa en la predicción de la máxima distancia de viaje recorrida por un bloque a lo largo de un perfil, a partir de la intersección de la topografía con una línea cuyo punto de partida puede ser la zona de inicio o el punto más alto de la ladera.

## 4.5 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO

En Colombia, las propuestas metodológicas para la evaluación de susceptibilidad y amenaza por flujos clasificados como avenida torrencial a escala 1:25.000 son frecuentemente geomorfológicas y de criterio experto, debido a la necesidad de información y la complejidad para el uso de modelos numéricos o analíticos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL, 2013).

De acuerdo con Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & UNAL (2013), los movimientos en masa tipo flujo (de lodos y detritos) que han sido clasificados como avenida torrencial, se presentan en cuencas con características morfométricas y climáticas particulares como las siguientes:

**Tamaño de la cuenca:** cuencas pequeñas entre 0,3 km<sup>2</sup> y 150 km<sup>2</sup>, algunos autores refieren tamaños hasta de 300 km<sup>2</sup>.

**Forma de cuenca:** cuencas con formas circulares. Para la definición de la forma de la cuenca se pueden usar índices como el de Gravellius, que relaciona el perímetro de la cuenca y su área; o el factor de forma que además utiliza la longitud axial de la cuenca. Estos índices permiten tener una idea de la probabilidad de crecientes (Mon-salve, 1999).

**Pendiente:** cuencas con valores de pendiente media en sus laderas entre 27° y 38° (Chen & Yu, 2011), y pendientes longitudinales del cauce mayores a 12° (Horton, 2013).

**Geomorfología:** los flujos se presentan especialmente en cuencas con cañones en V, relieves abruptos y cambios bruscos de pendiente del cauce y en general, se evidencian depósitos de material fluviotorrencial.

**Precipitación:** cuencas localizadas en zonas con precipitaciones de alta intensidad.

Con el fin de considerar el escenario de movimientos en masa tipo flujo en el análisis de susceptibilidad, es necesario evaluar las anteriores características para validar los criterios usados y resultados obtenidos con la aplicación de esta u otra propuesta metodológica.

Una vez se cuente con las características morfométricas indicativas de ocurrencia de flujos en la cuenca, se propone para el análisis de susceptibilidad a escala 1:25.000 la identificación de zonas susceptibles a ser afectadas mediante el mapeo directo de subunidades geomorfológicas. El objetivo de los análisis a esta escala es identificar las zonas posiblemente afectadas por el depósito de estos procesos, en las cuales se deberán ejecutar estudios detallados para el análisis y evaluación de amenaza. Naturalmente, los criterios aquí presentados no sustituyen en ningún caso los resultados que se puedan obtener de la aplicación de metodologías o modelaciones analíticas o numéricas.

La susceptibilidad se obtiene a partir de la cartografía de subunidades indicativas como las presentadas en el numeral 3.2.1. En este caso, se propone extraer estas zonas directamente del mapa geomorfológico y categorizar su susceptibilidad con base en las características que las definen (Tabla 4.7). Como se mencionó anteriormente, existen geoformas que pueden constituir posibles zonas de aporte de material durante el tránsito del flujo, las cuales a criterio del experto pueden también ser mapeadas como zonas de susceptibilidad.

» **Tabla 4.7.** Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo

CLASE O CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	UNIDAD / SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA*
ALTA	Dl cad, Dl car, Faa ac, Fcd y
MEDIA	Fa as
BAJA	Faa a, Faa i

\*Subunidades indicativas presentadas en la Tabla 3.9

Fuente: autores.

Estos criterios deben ser complementados con los datos obtenidos del inventario de procesos morfodinámicos (numeral 3.1.1.1), así como con cartografía social que permita definir áreas de inundación, alturas de flujo, recurrencia de los eventos y, en lo posible, daños asociados como un indicio de la energía del proceso.

Un análisis más completo de susceptibilidad debería incluir tanto el análisis de las posibles fuentes de inicio, como trayectorias y zonas de alcance o distancias de viaje del flujo (Portilla et al., 2010). Para calibrar las zonas de susceptibilidad obtenidas a partir de mapeo directo e integrar otros aspectos como las posibles áreas o puntos de inicio a la escala 1:25.000, es recomendable utilizar modelaciones con herramientas SIG como Flow-R (Desarrollado por la Universidad de Lausana en Suiza y disponible para libre descarga en [www.flow-r.org](http://www.flow-r.org)), el cual ha sido aplicado con resultados satisfactorios en varios países (Horton et al., 2013; Kappes et al., 2011; van Westen, 2013). La ventaja de este modelo es que puede ser aplicado a escala media con un mínimo de datos de entrada, ya que está basado en aproximaciones simplificadas a partir

de modelos empíricos. En cualquier caso la calibración, ajuste y validación de los parámetros y resultados obtenidos en el análisis, deben estar basados en el levantamiento y conocimiento de eventos pasados. Con el fin de integrar los resultados obtenidos en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamientos (numeral 4.3), las zonas categorizadas como de susceptibilidad alta pueden considerarse posibles fuentes de inicio de procesos tipo flujo en una modelación con Flow-R.

#### 4.6 SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO REPTACIÓN

En este tipo se han agrupado todos los movimientos lentos a extremadamente lentos que en general registran algún tipo de actividad durante largos periodos de tiempo (Hungry et al., 2014). Considerando la complejidad implícita en el análisis de este tipo de procesos tanto en términos de su distribución espacial como temporal, así como, de las características físicas y mecánicas que los definen, se propone la delineación de la zona afectada a partir del inventario de procesos y mapeo geomorfológico, la cual será representada en el mapa de susceptibilidad con una simbología definida y en la cual no se realizará una categorización específica. Debe tenerse en cuenta que el material removido y movilizado en estos procesos puede ser fuente primaria de deslizamientos superficiales y flujos (Hungry et al., 2014), por lo que la posible evolución de estos procesos debe ser un factor a analizar especialmente en zonas donde existan elementos expuestos. En estos casos pueden incluirse en el análisis de procesos tipo deslizamiento.

#### 4.7 ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

De acuerdo con la revisión de los resultados compilados en SGC (2017a), en los que se presentan los deslizamientos como los tipos de movimientos

en masa más frecuentes en la mayoría del territorio colombiano, se propone tomar como base para la zonificación de susceptibilidad los resultados obtenidos en el análisis por movimientos tipo deslizamiento. Aunque los factores condicionantes y su combinación pueden diferir entre uno y otro tipo de movimiento, pueden existir áreas en que se superpongan zonas de susceptibilidad de diferentes tipos de movimiento, por lo que se propone el siguiente procedimiento en herramientas SIG:

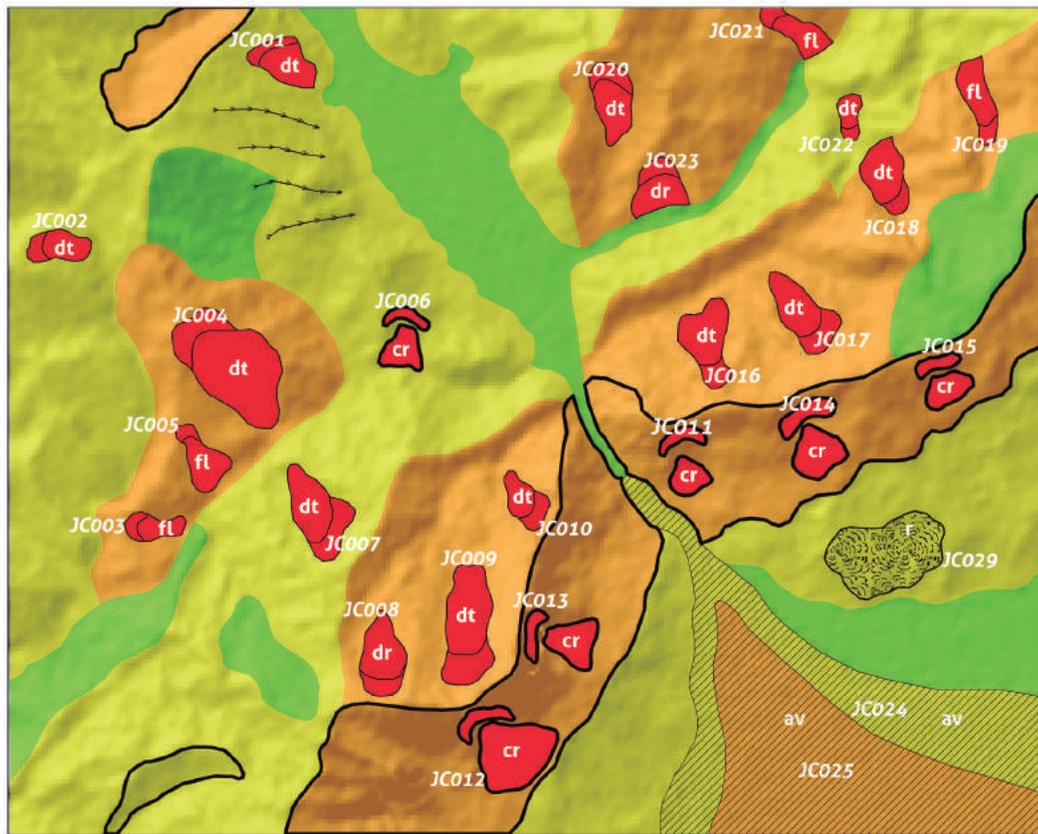
1. Superponer las zonas de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamientos y caídas.
2. Aplicar la matriz presentada en la Tabla 4.8.
3. Reclasificar de acuerdo con las categorías de la matriz.
4. Superponer las zonas de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo.
5. Aplicar la matriz presentada en la Tabla 4.8, dejando en las columnas las zonas de susceptibilidad obtenidas en los pasos 1, 2 y 3, y en las filas, las zonas de susceptibilidad por flujos.
6. Reclasificar de acuerdo con las categorías de la matriz.
7. Superponer los polígonos de reptación.

En el mapa de susceptibilidad final se deben diferenciar las zonas de susceptibilidad por tipo de movimiento en masa y se deben superponer los movimientos en masa del inventario de procesos diferenciando tanto el tipo de movimiento como su identificador. Adicionalmente, deben incluirse los rasgos geomorfológicos presentados en el numeral 3.2.1. En la Figura 4.6 se presenta un ejemplo de la información cartográfica que debe contener el mapa de susceptibilidad final. La explicación de las categorías y la leyenda del mapa final se presentan a continuación.

» **Tabla 4.8.** Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes tipos de movimiento en masa

		Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento		
		Baja	Media	Alta
Susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída	Baja	Baja	Media	Alta
	Media	Media	Media	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta

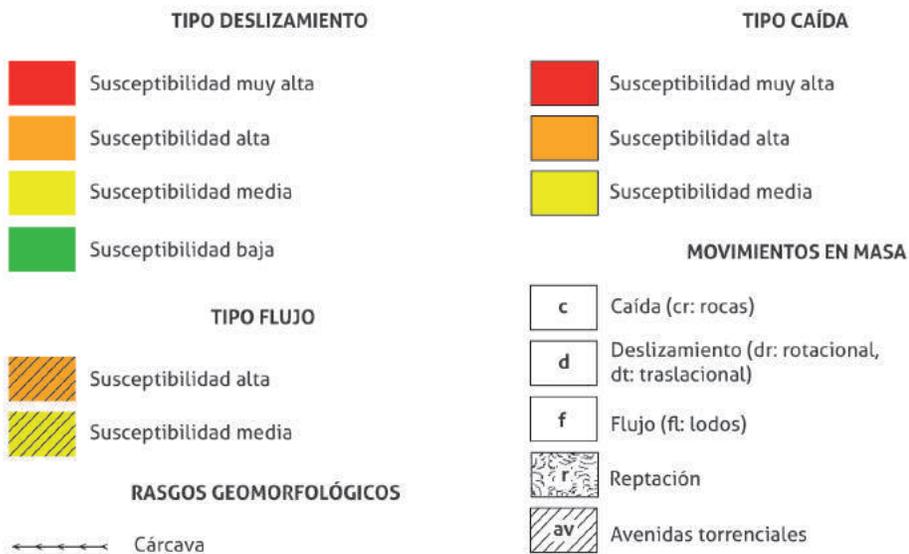
Fuente: autores.



ESCALA 1:25.000



CATEGORÍAS DE SUSCEPTIBILIDAD



» **Figura 4.6.** Ejemplo de representación cartográfica del mapa de susceptibilidad final

Fuente: autores.

### 4.7.1 Leyenda del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa

La leyenda del mapa de susceptibilidad debe incluir tanto información relacionada con los tipos y subtipos de movimiento en masa en la zona de estudio, como las características o factores condicionantes que determinan la mayor o menor posibilidad de ocurrencia de cada tipo de movimiento en las categorías de susceptibilidad. En la Tabla 4.9 se presenta un esquema del contenido de la leyenda del mapa de susceptibilidad final, con el que se busca estandarizar la información mínima que esta debe contener.

*Susceptibilidad Muy Alta:* corresponde a los movimientos en masa obtenidos en el inventario de procesos morfodinámicos. En estas áreas se incluyen los movimientos tipo deslizamiento y caída. Los polígonos de flujos clasificados como avenida torrencial o reptación no hacen parte de esta categoría.

*Susceptibilidad Alta y Media:* en estas categorías debe incluirse la descripción de los tipos de movimiento que pueden ocurrir y una descripción breve de los factores geoambientales que condicionan esta posibilidad, haciendo énfasis en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados obtenidos en el análisis de cada tipo de movimiento. Cada tipo de movimiento está condicionado por un factor o una combinación de factores específica, que debe describirse de manera precisa en la leyenda.

*Susceptibilidad Baja:* descripción de las características geoambientales que condicionan la ausencia o muy baja posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa. Esta descripción también debe estar basada en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados de los análisis por tipo de movimiento que se hayan realizado.

## 4.8 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La validación de estos mapas puede hacerse en la práctica mediante tres formas: a partir de la ocurrencia de nuevos movimientos en masa, con métodos de validación tradicionales y a partir de análisis estadísticos (Corominas & Mavrouli, 2011b).

La forma ideal de validación consiste en esperar la ocurrencia de un nuevo movimiento en masa y verificar la zona del mapa clasificada como inestable. Aunque es un método científicamente válido, no es viable para aplicación con fines de ordenamiento territorial o gestión del riesgo.

Los métodos tradicionales y análisis estadísticos permiten la comparación de la densidad o área de movimientos en masa por cada clase de susceptibilidad mediante, por ejemplo, índices de densidad relativa (Corominas & Mavrouli, 2011b). Dentro de los análisis estadísticos pueden incluirse las tablas de contingencia y curvas de éxito, cuyos resultados permiten obte-

» **Tabla 4.9.** Contenido de la leyenda del mapa de susceptibilidad

CATEGORÍA	TIPOS Y SUBTIPOS DE MOVIMIENTO	CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTALES – FACTORES CONDICIONANTES
<b>MUY ALTA</b>	Movimientos en masa activos del inventario de procesos morfodinámicos	
<b>ALTA</b>	Deslizamientos	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo
	Caídas	
	Flujos	
<b>MEDIA</b>	Deslizamientos	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo
	Caídas	
	Flujos	
<b>BAJA</b>	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo	

Fuente: autores.

ner una idea de la adecuada clasificación y predicción de las zonas clasificadas. Una revisión detallada de estos métodos se puede encontrar en Corominas & Mavrouli (2011b) y Chung & Fabbri (2003).

Es muy importante tener en cuenta que la validación a partir del análisis de datos no se puede

tomar como absoluta y requiere de una cuidadosa revisión de los expertos que conocen el área de estudio. Aquellas zonas donde la clasificación de susceptibilidad no explique los resultados o sean inconsistentes, deben ser analizadas y discutidas por los expertos, con el fin de establecer la razón de las clasificaciones incorrectas.



A landscape photograph showing rolling hills with significant soil erosion. The hills are covered in green vegetation, but large sections of the topsoil have been eroded away, revealing a reddish-brown subsoil. The erosion has formed deep gullies and exposed soil banks. In the distance, there are some buildings and more trees under a cloudy sky.

**5**

# **CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA**



# | Capítulo 5 |

El análisis de amenaza por movimientos en masa puede ser abordado desde diferentes enfoques y metodologías, que a su vez dependen de los objetivos, la escala de trabajo y la calidad de los datos disponibles.

En escalas medias la amenaza se caracteriza teniendo en cuenta el tipo de movimiento en masa (deslizamiento, flujo y caída), la probabilidad espacial relacionada con la susceptibilidad, la probabilidad temporal expresada normalmente en términos de frecuencia, periodo de retorno o probabilidad de excedencia (Corominas & Moya, 2008), y su intensidad o magnitud como una medida del daño que puede causar, propuesto por distintos autores como una función del volumen (o área) y la velocidad esperada (Cardinali et al., 2002; Portilla et al., 2010), estableciendo también relaciones magnitud - frecuencia (M-F) en las que se conoce la frecuencia esperada de ocurrencia de un movimiento en masa de una magnitud dada.

Un análisis de amenaza por movimientos en masa, que permita establecer características espaciales, temporales y de intensidad, depende fundamentalmente de la disponibilidad de inventarios de movimientos en masa basados en eventos o multitemporales, en los que se pueda establecer una relación directa entre la frecuencia de ocurrencia de un tipo de movimiento en masa y un evento detonante, que además permitirá realizar análisis magnitud-frecuencia. Este tipo de inventarios se deben elaborar casi inmediatamente luego de la ocurrencia del evento detonante, por lo que en la mayoría de las áreas del país no se cuenta con este tipo de información.

Considerando la incertidumbre y las posibles limitaciones de información de precipitaciones y sismos que detonan movimientos en masa, se propone en conservar los límites espaciales de las categorías del mapa de susceptibilidad en el mapa

de amenaza y caracterizarlas en términos de su probabilidad espacial, su probabilidad temporal y su magnitud (van Westen et al., 2014). Las características de intensidad se pueden incorporar en términos de evaluación de las distancias de viaje en movimientos en masa tipo caída y flujo, con metodologías empíricas a partir del mapeo geomorfológico o uso de modelos como Flow-R. En este caso se propone el análisis de magnitudes en términos de áreas o volúmenes para el caso de deslizamientos, tomando como base la información del inventario multitemporal o de eventos, de áreas o volúmenes y frecuencias para flujos y de tamaño de bloques o volúmenes para movimientos en masa tipo caída.

En cada categoría de amenaza se debe presentar la siguiente información:

- » Probabilidad espacial: la probabilidad de que un pixel localizado dentro de una clase de susceptibilidad sea afectado por la ocurrencia de un movimiento en masa.
- » Probabilidad temporal: definida en términos de la frecuencia de ocurrencia de movimientos en masa y descrita en términos de probabilidad empírica o por correlación con los valores críticos de los detonantes que pueden explicar la inestabilidad, denominados por Corominas et al., (2013) como enfoques indirectos.
- » Magnitud: una medida aproximada de la intensidad del evento, en términos de áreas afectadas, volúmenes o tamaños de material.

Con el fin de elaborar mapas de amenaza cada vez más completos, se deben realizar esfuerzos por parte de las entidades del orden nacional y regional para recopilar información que permita mejorar en el futuro el conocimiento

de las relaciones lluvias-deslizamiento y sismos-deslizamientos, y establecer funciones que consideren además escenarios de cambio climático y el incremento en la frecuencia de los movimientos en masa causados por la actividad humana (Remondo et al., 2005). Sin embargo, si los planes de acción para gestión del riesgo y ordenamiento territorial incluyen obras civiles para la mitigación de la amenaza, estas deberán tomar en cuenta los nuevos escenarios de cambio climático (IDEAM et al., 2015).

Para la caracterización de la amenaza es necesario integrar las categorías de susceptibilidad alta y muy alta, de tal manera que se cuente solo con tres categorías de amenaza de acuerdo con la normatividad vigente (Decreto 1807 de 2014). De esta forma se tendrán tres categorías de amenaza como se presenta en la Tabla 5.1.

» **Tabla 5.1.** Categorías de amenaza a partir de las categorías de susceptibilidad

CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	CATEGORÍA DE AMENAZA
Muy Alta	Alta
Alta	Alta
Media	Media
Baja	Baja

Fuente: autores.

## 5.1 PROBABILIDAD ESPACIAL

La probabilidad espacial de ocurrencia de un tipo de movimiento en masa específico se define para las tres categorías de amenaza. Cada una de estas áreas tiene una probabilidad de que se genere un movimiento en masa definida por la relación entre el número de píxeles que representan movimientos en masa (zona de inicio o depósito) y el número de píxeles de la categoría de amenaza. Dado que para el análisis de susceptibilidad por deslizamientos se ha propuesto considerar la zona de inicio y de depósito en un solo polígono de agrupamiento, se considera el número de píxeles que representa el área total del movimiento en masa. La susceptibilidad por

flujos y caídas, analizada solo para zonas de depósito a partir de evidencias geomorfológicas, no será evaluada en términos de probabilidad espacial, a menos que se complemente con algún modelo que permita establecer la potencialidad de alcance de procesos de este tipo como Flow-R o el método de la línea de energía desarrollado por Heim (1932, citado por Mavrouli et al., 2014), para caídas de roca.

## 5.2 PROBABILIDAD TEMPORAL

El cálculo de la probabilidad temporal en términos de periodos de retorno, frecuencias o probabilidades de excedencia, está enfocado en caracterizar cada categoría de susceptibilidad y en este documento se sugieren diferentes enfoques de acuerdo con el tipo de movimiento en masa, la información disponible y la calidad de la misma.

Dado que para las relaciones lluvia-deslizamiento se cuenta con información multitemporal en la que se pueden establecer, al menos de forma general, períodos de retorno o probabilidades de excedencia anual, es necesario presentar siempre análisis de información para establecer la relación de frecuencias con el detonante lluvia.

En relación con el detonante sismo, los inventarios de movimientos en masa basados en eventos de este tipo son escasos y solo se pueden plantear algunas estimaciones generales a partir de información disponible y curvas teóricas, para establecer una posible relación sismo-deslizamiento. En este caso es muy difícil establecer períodos de retorno o probabilidades anuales; sin embargo, el análisis de este tipo de información debe también ser presentado de acuerdo con los criterios descritos en el numeral 5.2.2.

Sólo en el caso en que, a juicio del analista, no se cuente con un registro representativo de temporalidad de movimientos en masa y detonantes que permitan establecer una adecuada relación, se calcula la frecuencia de ocurrencia de deslizamientos a partir de probabilidades empíricas.

Para los movimientos en masa tipo flujo, las categorías alta y media de susceptibilidad se pueden ajustar de acuerdo con el criterio del experto y con base en el inventario de información

secundaria, la interpretación de sensores remotos, observaciones de campo y el trabajo realizado a partir de encuestas, y cartografía social en zonas ocupadas o con posibles procesos de ocupación que permitan definir, con mayor precisión, la frecuencia y magnitud de estos eventos. Por tanto, la asignación de la amenaza en estos procesos es subjetiva y cualitativa. No existe una regla específica para establecer clases de frecuencias de flujos; por tanto, se sugiere utilizar las siguientes recomendaciones para establecer clases de frecuencia alta, media y baja en las categorías de amenaza, según Corominas & Moya, (2008): al menos un proceso en los últimos 30 años (frecuencia alta), al menos un proceso en un rango de 30 a 300 años (frecuencia media), al menos un proceso en los últimos 300 años o más (frecuencia baja); y de acuerdo con Cardinalli et al. (2002), con una propuesta menos conservadora, sugiere las siguientes descripciones para el número de recurrencias de eventos en 60 años:

- » Muy alta: 3 o más eventos
- » Alta: Hasta 3 eventos
- » Media: Hasta 2 eventos
- » Baja: 1 evento

En procesos tipo caída relacionados con condiciones específicas, como por ejemplo con cortes que se realizan en la construcción de vías, ferrocarriles u otros tipos de obras lineales, se pueden establecer también frecuencias con base en el número de caídas por unidad de longitud por año Corominas & Moya, (2008).

Es necesario en todas las zonas de estudio realizar y presentar una exhaustiva recopilación de información disponible, con la que se pueda justificar el uso de uno o varios de los métodos aquí propuestos, siendo siempre prioritaria la información multitemporal de inventario de procesos morfodinámicos y eventos detonantes.

### 5.2.1 Detonante lluvia

En general, los movimientos en masa más frecuentes son los deslizamientos y se cuenta con un inventario multitemporal con fecha de ocurrencia y con estaciones pluviométricas con registros diarios de precipitación. En el caso de

los inventarios basados en eventos, se establece el periodo de retorno calculado a partir del número de excedencias en el periodo de registro disponible de la lluvia de 24 horas y de la lluvia antecedente representativa, aplicando la probabilidad de Poisson. Sin embargo, si se cuenta con registros de intensidad-duración se establece el periodo de retorno a partir de la respectiva curva de la estación pluviométrica.

#### 5.2.1.1 Cálculo de periodos de retorno o probabilidades de excedencia anual

El análisis de la relación movimiento en masa y detonante es particular para cada zona de estudio y el objetivo de los estudios realizados con este enfoque busca determinar los valores críticos del detonante que pueden explicar la posible ocurrencia de un movimiento en masa (Corominas et al., 2013).

En general, se propone realizar el análisis a partir del periodo de retorno de la lluvia de 24 horas que detonó el evento o el movimiento en masa, y de la lluvia acumulada antecedente asociada. Si se tiene inventario de varios eventos de lluvia que detonaron movimientos en masa (mínimo tres) se pueden establecer relaciones de magnitud-frecuencia (M/F) y periodos de retorno de los mismos.

El cálculo del umbral de lluvia, a partir de un inventario multitemporal, se realiza a partir de un modelo empírico y con base en las siguientes premisas:

- » Se cuenta con una base de datos que contiene la localización y fecha de movimientos en masa en un rango representativo de tiempo.
- » Existen estaciones con registros de precipitación diaria localizadas preferiblemente a distancias menores a 11 km de los movimientos en masa seleccionados (Moreno et al., 2006). Las estaciones deben representar adecuadamente el régimen de precipitación de la cuenca o área de estudio a juicio del hidrólogo, y la asociación de cada movimiento en masa se debe realizar con la estación más cercana.
- » Si existe la suficiente cantidad de datos, esta metodología se puede aplicar para establecer umbrales por tipo y por magnitud de movimiento en masa.

Se propone realizar la estimación de la probabilidad de excedencia de un umbral mínimo de lluvia que puede detonar un evento, con base en procesos empíricos, a partir de curvas envolventes con las cuales se define una función lineal que involucra la lluvia diaria y la lluvia antecedente, de acuerdo con lo planteado por Jaiswal & van Westen (2009), y establecer probabilidades de excedencia de cada tipo de movimiento en masa.

No siempre que el umbral mínimo es excedido se detona un movimiento en masa, debido a otros factores locales que influyen en la iniciación del mismo (Aleotti & Chowdhury, 1999), por lo cual la probabilidad final se calcula como la probabilidad condicional de que se exceda un umbral de lluvia y la probabilidad que ocurra un deslizamiento dada esta condición (Jaiswal & van Westen, 2009). Sin embargo, dado que en el inventario de información secundaria no se registran todos los movimientos en masa detonados por lluvia sino, en general, aquellos que causaron algún tipo de afectación o daño, en esta guía se propone como una simplificación conservadora del modelo, estimar la probabilidad de que se exceda un umbral de lluvia. La metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de los umbrales de lluvia se presenta en la Figura 5.1. Es importante resaltar la necesidad de actualizar periódicamente la información de inventario de movimientos en masa o realizar inventarios para eventos específicos con el fin de mejorar los análisis de frecuencias y los umbrales inicialmente propuestos.

La cantidad de estaciones con registros de precipitación con agregación diaria a nivel nacional es mayor comparada con las estaciones pluviográficas o automáticas, éstas últimas son más escasas, razón por la cual se sugiere evaluar la relación lluvia-deslizamiento a partir de los registros diarios que involucren, además, el análisis de la lluvia antecedente que detona movimientos en masa. Sin embargo, si se cuenta con curvas intensidad-duración-frecuencia, los análisis se pueden realizar a partir de éstas.

Para empezar, se deben realizar los análisis estadísticos que aseguren la completitud de las series de registros de precipitación, la identificación de errores (groseros, sistemáticos y aleato-

rios) para garantizar la calidad de las series de precipitación (Monsalve, 1999).

#### 5.2.1.1.1 Probabilidad de excedencia de un evento

En el caso de un evento de lluvia que detonó múltiples movimientos en masa con los cuales se realizó la zonificación de la susceptibilidad, se define la probabilidad de excedencia o periodo de retorno del mismo, así:

- » Establecer el número de días antecedentes al evento con lluvia de 24 horas constante.
- » Acumular para toda la longitud del registro de lluvia de 24 horas, el número de días antecedentes con lluvia constante. Por tanto, en un año se tiene 365 datos de lluvia antecedente.
- » Establecer la distribución de probabilidades de valores máximo aleatorios que mejor se ajusten a los valores máximos diarios anuales y máximos antecedentes anuales. Por tanto, si la longitud del registro es de 30 años, se cuenta con 30 valores máximos.
- » Definir, de acuerdo con los resultados del ítem anterior, cuál es el periodo de retorno asociado a la lluvia de 24 horas y a la lluvia antecedente definida.
- » Calcular la probabilidad de excedencia anual y el periodo de retorno para el cual coinciden las dos variables aplicando la distribución de Poisson presentada en el numeral 5.2.3.

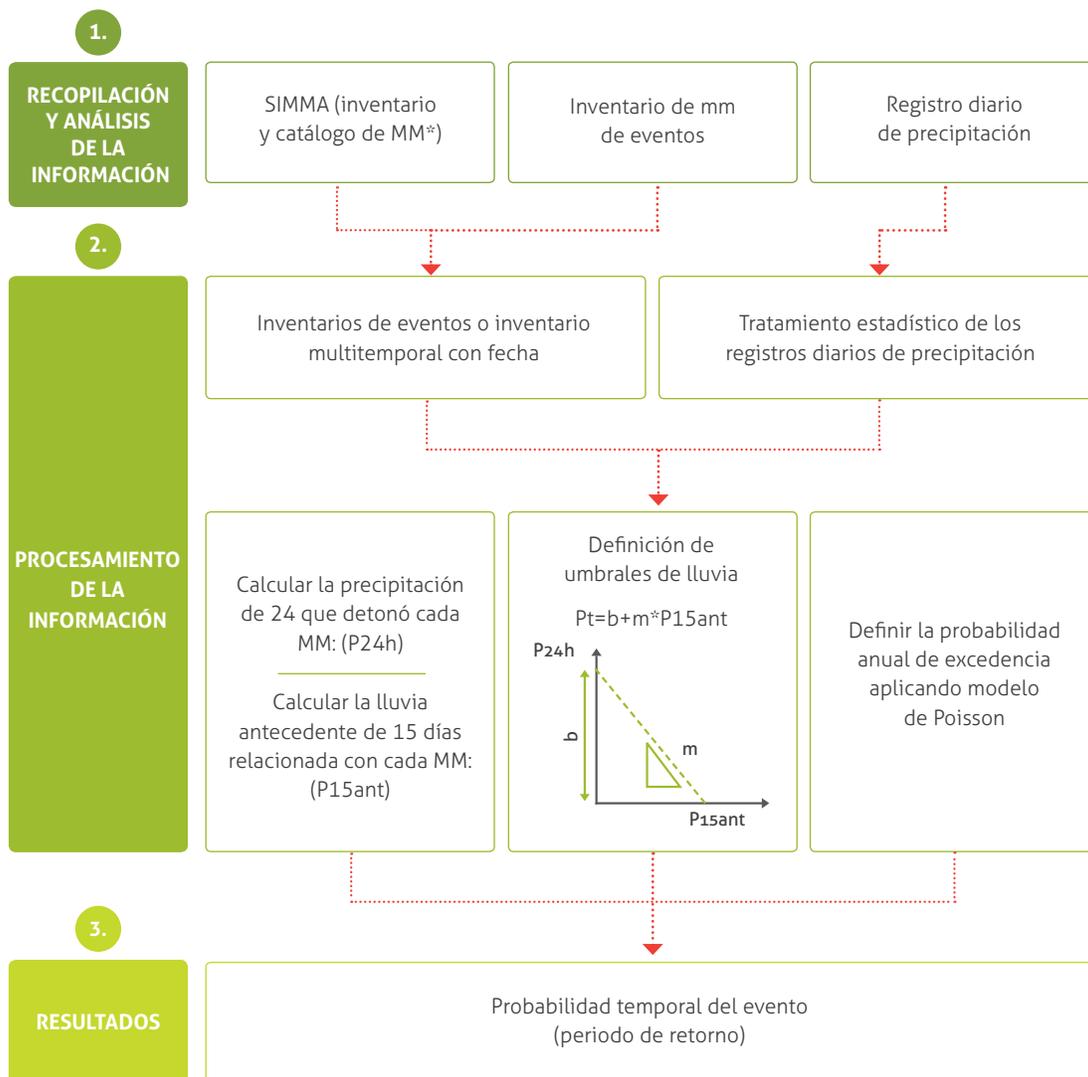
#### 5.2.1.1.2 Probabilidad de excedencia de umbrales de lluvia a partir de un inventario multitemporal

Un inventario multitemporal contiene movimientos en masa que fueron detonados en condiciones de lluvia disímiles, por tanto, se establece un umbral de lluvia que represente el conjunto de datos. Se propone establecer la lluvia antecedente de 15 días. Sin embargo, la lluvia antecedente puede variar de acuerdo con las condiciones del área de estudio, la disponibilidad de información y criterio experto; algunos autores han utilizado diferentes número de días de lluvia antecedente (3, 15, 50 días) (Guzzetti et al., 2007).

A continuación se enumeran los pasos a seguir para el cálculo de la probabilidad de excedencia (Figura 5.1):

- » Establecer los registros de inventario de procesos con fecha y localización conocida.
- » Para cada fecha en la que se registró un movimiento en masa se calcula la lluvia antecedente de 15 días (sin incluir la precipitación del día en que ocurrió)
- » Construir una gráfica en la cual el eje de las abscisas ( $x$ ) representa la lluvia de los 15 días antecedentes ( $P_{15ant}$ ) y en el eje de las ordenadas ( $y$ ) la precipitación de las 24 horas ( $P_{24h}$ ) (ver Figura 5.2).
- » Si se cuenta con varias estaciones, para cada una se establece una función que represente el umbral de lluvia a partir de los cuales se detona un movimiento en masa. La representación de los umbrales de lluvia se realiza mediante la Ecuación 5.1 y se puede establecer a partir de las áreas específicas de análisis o para estaciones pluviométricas definidas (Jaiswal & van Westen, 2009).

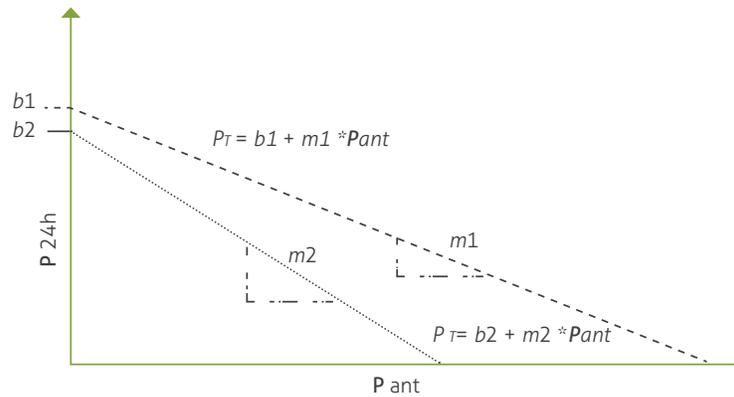
$$P_T = b + m * P_{ant} \quad \text{(Ecuación 5.1)}$$



\* Movimientos en masa

» **Figura 5.1.** Metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia

Fuente: autores.



» **Figura 5.2.** Funciones que representan los umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa en un área específica de análisis

Fuente: autores.

La probabilidad anual de excedencia se estima como la probabilidad de que un evento exceda una o más veces el umbral de lluvia en un periodo de retorno. Para simplificar el modelo se supone que si la cantidad de lluvia en un periodo dado  $P(t)$ , excede el umbral de lluvia  $P_T$ , entonces la probabilidad que se detone el deslizamiento  $P[L]$  es igual a 1, siendo estos valores función de la lluvia diaria  $P_{24h}(t)$  y de la lluvia antecedente  $P_{ant}(t)$ . Estas cantidades medidas en mm se obtienen de la (Ecuación 5.2 y 5.3):

$$P(t) = f[P_{24h}(t), P_{ant}(t)] \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

$$P[L|P(t) > P_T] = 1 \text{ y } P[L|P(t) \leq P_T] = 0 \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

De lo anterior se deduce que (Ecuación 5.4):

$$P[L] = P[P(t) > P_T] \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

La probabilidad anual de excedencia se determina usando un modelo de probabilidad de Poisson, aplicando la Ecuación 5.5, un ejemplo de este cálculo se puede encontrar en Jaiswal & van Westen (2009).

Con el fin de entender el comportamiento temporal de las relaciones lluvia-deslizamiento en el área de estudio, se consideran la variabi-

lidad de la precipitación mensual y anual en términos de promedios y anomalías como el Fenómeno ENSO en su fase Niña. En general, se pueden establecer mayores ocurrencias de movimientos en masa en los meses más lluviosos en áreas de comportamiento monomodal y bimodal y en años con presencia del Fenómeno ENSO.

### 5.2.2 Detonante sismo

El estudio de movimientos en masa detonados por sismos ha sido abordado desde diferentes perspectivas, en las que se ha buscado encontrar una línea base para su incorporación en los estudios de amenaza. Keefer (1984) y Rodríguez et al. (1999) compilaron reportes históricos de movimientos en masa detonados por sismos alrededor del mundo, en los que se propusieron algunas relaciones entre la distribución espacial de diferentes tipos de movimiento en masa y parámetros sísmicos como magnitudes mínimas, máxima distancia a la zona epicentral y los movimientos en masa y mínima intensidad para la ocurrencia de un movimiento en masa, las cuales se pueden tomar como base para una primera aproximación en el análisis del detonante sismo. Es importante aclarar que estas relaciones tienen una alta incertidumbre y no siempre son válidas, debido a las particularidades geoambientales de cada zona de estudio y a la calidad de la información recopilada. Aunque se han realizado al-

gunos esfuerzos recientes para cubrir un amplio espectro de escenarios de análisis, factores como número de movimientos en masa detonados, distribución magnitud-frecuencia de los movimientos en masa y área total afectada por la ocurrencia de movimientos en masa, requieren aún mayor investigación y levantamiento de inventarios de movimientos en masa detonados por sismo bajo diferentes ambientes (Tanyas et al., 2017).

La elaboración de mapas de amenaza considerando escenarios de movimientos en masa detonados por sismo se puede abordar desde dos tipos de análisis: a partir de análisis estadísticos o con el uso de modelos físicos. Cuando se consideran análisis estadísticos, la principal limitación está relacionada con la baja existencia de inventarios de eventos, y con disponibilidad de inventarios de procesos detonados por un único evento sísmico, con los cuales es difícil plantear análisis para futuros escenarios, ya que cada sismo tiene características específicas. Los modelos físicos como el método de Newmark (Vega & Hidalgo, 2016) no presentan estas mismas limitaciones, pero son aproximaciones muy simplificadas que se enfocan principalmente en deslizamientos superficiales y requieren de información geotécnica detallada.

En el trabajo de Rodríguez (2007), se presentó una compilación de movimientos en masa detonados por sismos en Colombia, a partir de la cual se presentan algunas relaciones entre magnitud del sismo y características de movimientos en masa, con las cuales se puede plantear una aproximación para el análisis del detonante sismo en la zonificación de amenaza que se propone en esta guía. Estas relaciones se obtuvieron a partir de una base de datos de 35 sismos y fueron obtenidas siguiendo el mismo enfoque de Keefer (1984). Se debe tener en cuenta que en estas relaciones no se presentan datos a partir de los cuales se puedan definir intervalos de recurrencia o probabilidades temporales de ocurrencia, por lo que se propone a manera de revisión de información relacionada con la zona de estudio, una aproximación a partir de las recurrencias presentadas en la base de datos de fallas activas de Colombia (Montes & Sandoval, 2001). Como complemento de este análisis,

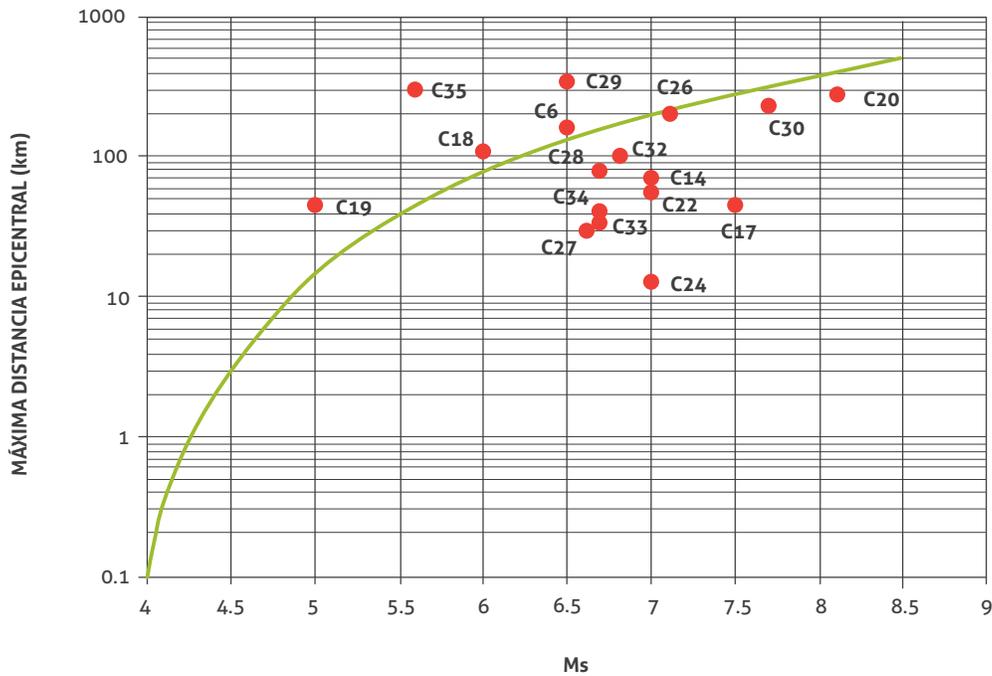
se pueden consultar los informes de sismos importantes (movimiento fuerte) disponibles en la página web del SGC, a través del Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG), en los cuales se han presentado reportes de afectación entre las que se encuentran la ocurrencia de movimientos en masa.

Los movimientos en masa detonados por sismo en Colombia son generados principalmente en suelos residuales de depósitos volcánicos, suelos transportados de origen aluvial, rocas sedimentarias y depósitos y rocas volcánicas. Los macizos rocosos más afectados estos procesos, son aquellos que están intensamente fracturados por efecto de la actividad tectónica. Los tipos más comunes de movimientos en masa son las caídas y deslizamientos superficiales en suelo y roca, así como, deslizamientos rotacionales en suelos residuales y derivados de depósitos volcánicos. En todos los casos, los análisis demuestran que la ocurrencia de movimientos en masa incluso en las zonas más lejanas donde las intensidades son menores, dependen de la susceptibilidad del terreno y las condiciones climáticas antecedentes al evento sísmico, por lo que estos datos se deben utilizar con precaución.

### 5.2.2.1 Relaciones sismo-movimientos en masa

De acuerdo con el trabajo de Keefer (1984), la magnitud mínima para la ocurrencia de un movimiento en masa es 4,0. En Colombia, Rodríguez (2007) encontró que la magnitud mínima histórica en la que se reporta la ocurrencia de movimientos en masa es de  $M_s = 5,0$  e intensidades en los niveles VI y VII de la escala de modificada de Mercalli.

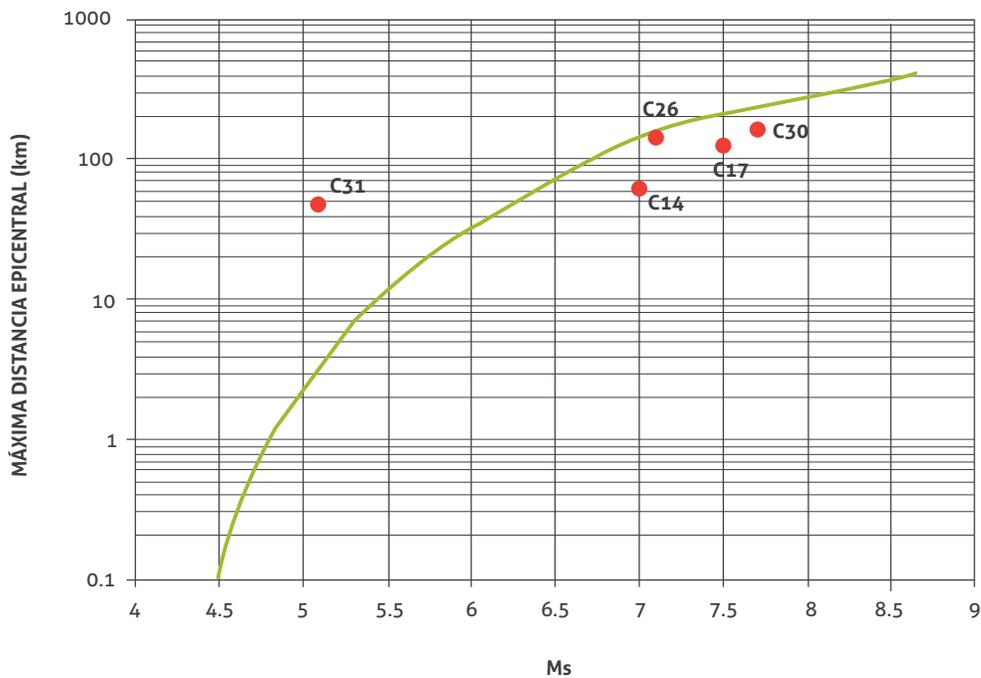
La máxima distancia entre epicentro y ocurrencia de movimientos en masa para Colombia es muy cercana a la encontrada por Keefer (1984), como se presenta en las Figura 5.3 y Figura 5.4. La clasificación de movimientos se presenta en dos tipos generales: movimientos en masa coherentes (incluye deslizamientos rotacionales profundos en suelo y roca, y flujos de tierra lentos) y movimientos en masa no coherentes (incluye caídas de roca y suelo, y deslizamientos traslacionales en suelo y planares en roca).



» **Figura 5.3.** Máxima distancia epicentral para movimientos en masa no coherentes

Las etiquetas corresponden a los códigos de movimientos en masa de la base de datos presentada por el autor.

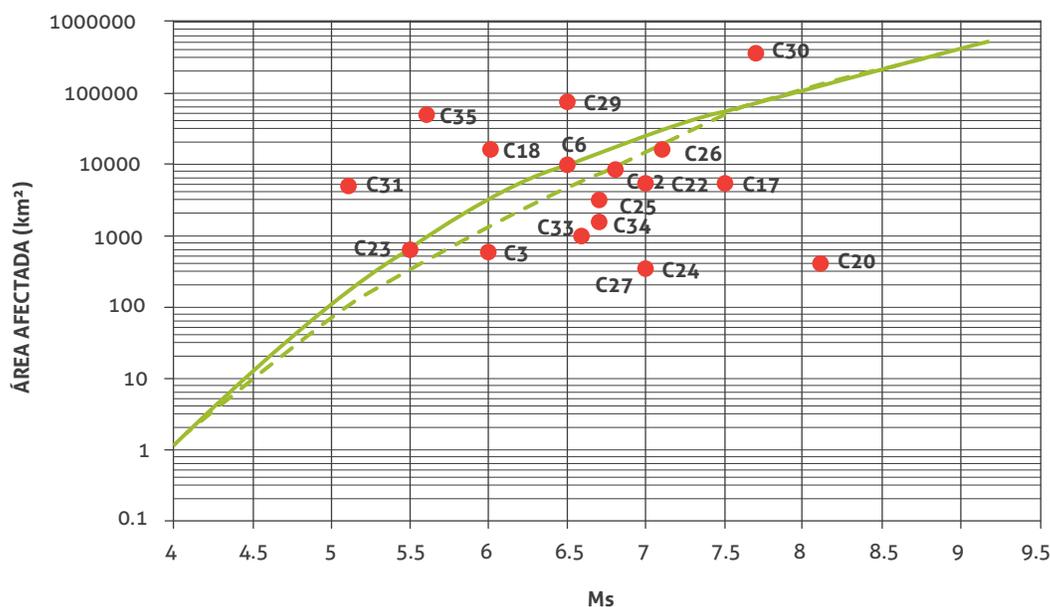
Fuente: tomado de Rodríguez (2007).



» **Figura 5.4.** Máxima distancia epicentral para movimientos en masa coherentes

Las etiquetas corresponden a los códigos de movimientos en masa de la base de datos presentada por el autor.

Fuente: tomado de Rodríguez (2007).



» **Figura 5.5.** Áreas afectadas por movimientos en masa durante sismos

Las etiquetas corresponden a los códigos de movimientos en masa de la base de datos presentada por el autor. La línea punteada corresponde a la envolvente de Keefer (1984).

Fuente: tomado de Rodríguez (2007).

Existen puntos que se localizan por encima de la envolvente propuesta, los cuales se relacionan con la influencia de lluvias antecedentes.

La relación entre área afectada por movimientos en masa y magnitud del sismo se presenta en la Figura 5.5. Los puntos que se localizan por encima de la envolvente están relacionados con la susceptibilidad inherente de las laderas y las lluvias antecedentes al evento sísmico.

Como se observa, en los resultados presentados existe una evidente dispersión en los datos, atribuible a la calidad de la información recopilada y la incertidumbre asociada con las condiciones antecedentes a la ocurrencia del evento. Además, existen otros parámetros sísmicos que podrían ser utilizados en este tipo de análisis como son la intensidad, tipo de falla, amplificación topográfica, profundidad focal, etc. (Havenith et al., 2016), los cuales tendrán que ser considerados en la medida en que avanza el conocimiento en el tema.

### 5.2.2.2 Caracterización del detonante sismo

Para caracterizar la amenaza por movimientos en masa en términos del detonante sismo, se pro-

pone el uso de las gráficas presentadas en el anterior numeral, como una aproximación de escala regional a partir de la revisión de la información disponible. En el caso ideal, durante la elaboración del inventario de procesos morfodinámicos (a partir de todas las fuentes de información disponibles) se deberían identificar los movimientos en masa de los cuales se tenga certeza que fueron detonados por un evento sísmico, a partir de los cuales se puede hacer una relación directa entre las características de los movimientos en masa, la fecha de ocurrencia y las características del sismo, con el fin de tener una idea de la temporalidad del evento. Sin embargo, en Colombia este tipo de información es escasa y tiene un alto grado de incertidumbre.

Para la caracterización del detonante sismo se proponen las siguientes etapas:

1. **Recopilación de información:** Se debe recopilar toda la información relacionada con eventos sísmicos presentados en la zona de estudio como el Catálogo sísmico histórico e instrumental de Colombia, Informes de eventos sísmicos importantes, Informes de emergencia y la Base de datos de fallas



activas de Colombia (Montes & Sandoval, 2001), la cual se encuentra disponible en la página web del SGG. Esta información puede ser complementada con las fuentes de información presentadas en el numeral 3.1.3. Esta recopilación debe estar enfocada a la búsqueda de información relacionada con fechas de los eventos y reportes de efectos inducidos por el sismo, específicamente en el tema de movimientos en masa.

2. Identificación de movimientos en masa: Durante la elaboración del inventario de procesos morfoodinámicos se deben identificar, de forma espacial y temporal, los movimientos en masa detonados por sismos a partir del análisis de todas las fuentes de información disponibles, incluido el trabajo de campo y la comunicación con la comunidad. Es necesario contar con fechas de ocurrencia de movimientos en masa, que permitan hacer una relación con las fechas y características de los eventos sísmicos.
3. Análisis de parámetros sísmicos: en el caso en que sea posible establecer con certeza la ocurrencia de movimientos en masa detonados por sismo en la zona de estudio y su temporalidad, se deben analizar los parámetros sísmicos asociados como magnitud, distancia epicentral y áreas de afectación. Estos datos se comparan con las curvas de Rodríguez (2007) y se puede establecer a nivel teórico la posibilidad de que nuevos movimientos en masa sean detonados en la zona de estudio por sismos de igual o mayor magnitud que los registrados.
4. Estimación de temporalidad: Con el fin de definir la temporalidad del detonante se propone la consulta de la Base de datos de fallas activas de Colombia (Montes & Sandoval, 2001) como una aproximación general de la recurrencia de los eventos sísmicos que posiblemente han detonado o detonarán movimientos en masa. Es necesario resaltar que esta es una propuesta teórica cuyo objetivo es la caracterización generalizada de las zonas de estudio y puede diferir de los enfoques y avances en el conocimiento

que actualmente se consideran en el estudio de la amenaza sísmica en Colombia. Los registros de eventos sísmicos importantes han sido asociados con fallas activas a escala nacional, las cuales han sido caracterizadas con datos de actividad entre los que se pueden encontrar las magnitudes de sismos e intervalos de recurrencia que dan cuenta de la temporalidad de los eventos. Con la información de localización de las fallas con respecto a la zona de estudio, las características de actividad (magnitudes esperadas e intervalos de recurrencia) y las curvas de parámetros sísmicos en función de áreas afectadas por movimientos en masa o distancia epicentral máxima, es posible definir la posibilidad de incidencia del detonante sismo en la zona de estudio.

En los casos en que no se encuentre suficiente información que permita establecer la posible ocurrencia de movimientos en masa detonados por sismo, no será posible incluir la caracterización del detonante en los resultados del estudio. Sin embargo, su exclusión debe estar adecuadamente justificada en una exhaustiva recopilación de información que debe ser presentada en el informe final.

Dado que la mayoría de las pérdidas humanas y económicas ocasionadas por movimientos en masa detonados por sismos están asociadas con la ocurrencia de flujos con la capacidad de viajar a altas velocidades y grandes distancias de viaje desde su punto de inicio (Keefer, 1984), es más relevante un adecuado mapeo geomorfológico de zonas de depósito y tránsito, que la propia caracterización temporal. Las caídas de roca y suelo a causa de eventos sísmicos son otros de los procesos más abundantes asociados con pérdidas humanas y económicas, ya que se presentan prácticamente en cualquier litología en inclinaciones mayores a los 40°; en este caso, dado que su posibilidad de viaje está limitada a algunos cientos de metros desde la base de las laderas, la identificación de las zonas susceptibles a este tipo de procesos determina la posibilidad de ser detonados por sismo.

### 5.2.3 Probabilidad Empírica – Distribución de Poisson

Si no se cuenta con un inventario de procesos morfodinámicos representativo en que se tengan fechas conocidas de ocurrencia de los movimientos en masa, se propone calcular la probabilidad a partir del inventario multitemporal obtenido desde la identificación en sensores remotos de las ocurrencias o reactivaciones de movimientos en masa los cuales cuentan con fecha de toma.

El cálculo de la probabilidad de ocurrencia de futuros procesos tipo deslizamiento se puede ajustar a una distribución de probabilidad como la de Poisson, con base en las estadísticas de los eventos pasados según lo considerado en Crevelli (2000).

De acuerdo con el modelo de Poisson la probabilidad de que se detonen uno o más deslizamientos durante un tiempo  $t$  está dada por la Ecuación 5.5:

$$P(N \geq 1; t) = 1 - (e^{-\lambda t}) \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Donde,  $N$  es el número de deslizamientos que ocurren durante el tiempo  $t$ ;  $\lambda$  es el promedio de ocurrencias de deslizamientos en el mismo intervalo de tiempo, el cual se puede obtener del análisis multitemporal de movimientos en masa. Sin embargo, esta probabilidad está estrechamente ligada a la magnitud de los movimientos en masa y a sus diferentes tipos.

Es importante aclarar que para el cálculo de probabilidad temporal asumiendo esta distribución, se debe hacer una exhaustiva revisión de toda la información de inventario de procesos morfodinámicos disponible, en la cual se ha realizado un riguroso trabajo de análisis de información secundaria, bases de datos y especialmente interpretación visual de imágenes, abarcando un amplio periodo de análisis que permita definir intervalos de tiempo y promedios de ocurrencia con la menor incertidumbre posible. En el caso de escoger este método para caracterización de la amenaza, se debe presentar una relación clara de todas las fuentes de información consultadas y analizadas para validar su conveniencia.

## 5.3 ANÁLISIS DE MAGNITUD

La magnitud de un movimiento en masa es entendida como una medida de su tamaño (Corominas et al., 2015) y puede ser descrita cuantitativamente por su volumen o indirectamente por su área (Portilla et al., 2010; Portilla, 2014). Al igual que para las demás características depende de la información disponible.

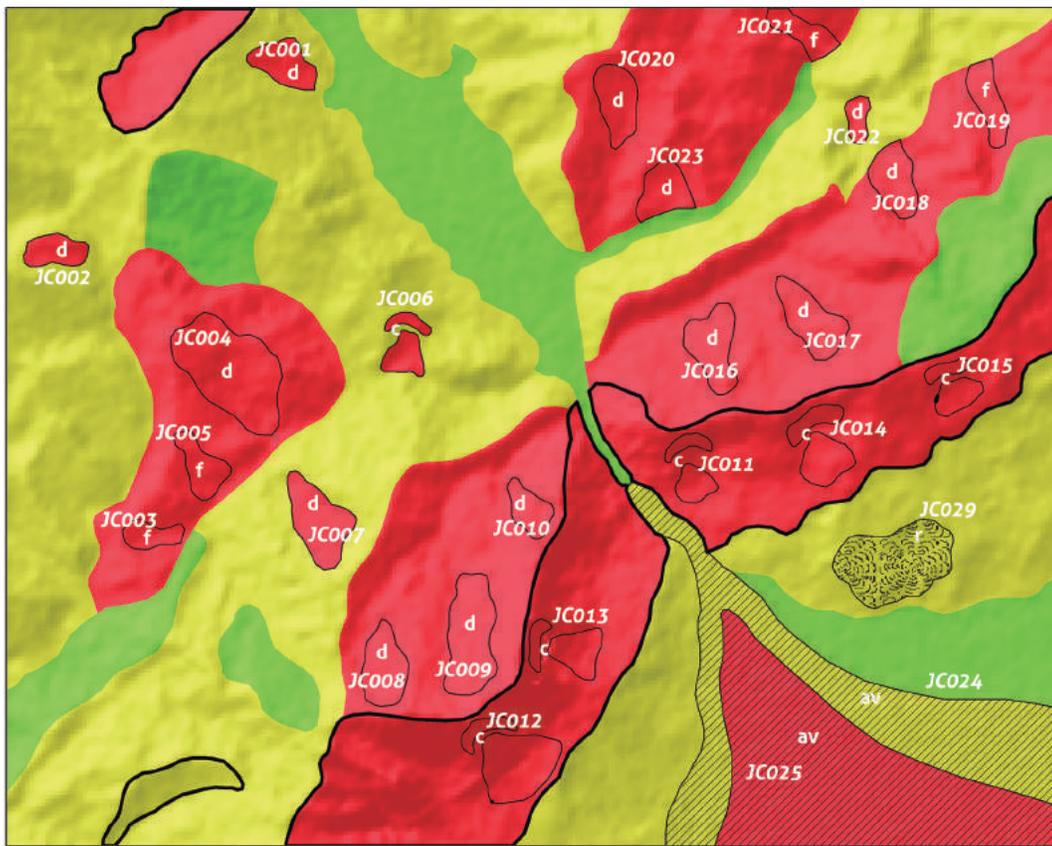
Para cada categoría de amenaza se deben analizar los tamaños de movimientos en masa y sus distribuciones de frecuencias (relativas y acumuladas) a partir del inventario de procesos morfodinámicos. Los movimientos en masa tipo caída se pueden analizar en términos de tamaño de bloques o volumen y los deslizamientos en términos de su área o volumen. Para los movimientos en masa tipo flujo clasificados como avenida torrencial se debe estimar la frecuencia de la magnitud de los eventos en términos de volúmenes depositados o al menos de áreas afectadas.

Si la distribución de frecuencias de la magnitud se puede ajustar a una distribución de probabilidad específica, se pueden establecer probabilidades de magnitud de procesos mayores o iguales a un tamaño específico.

## 5.4 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

El mapa de zonificación de la amenaza debe presentar tres categorías de acuerdo con la Tabla 5.1. En el mapa producto se deben diferenciar las zonas según el tipo de movimiento analizado y sus características de acuerdo con el esquema que se presenta en la Figura 5.6.

En este mapa además se incluye el inventario de movimientos en masa, en el cual se diferencian los tipos principales y su identificador. El contenido recomendado del mapa se presenta en el Anexo 6.1.



ESCALA 1:25.000



CATEGORÍAS DE AMENAZA



» **Figura 5.6.** Ejemplo de visualización del mapa de amenaza por movimientos en masa con sus atributos representados

Fuente: autores.

### 5.4.1 Leyenda del mapa de amenaza

En la leyenda del mapa de amenaza se deben presentar las categorías de amenaza junto con las características definidas anteriormente. Además, se deben incluir descripciones estadísticas sobre las áreas de cada categoría en la zona de estudio y localización o cubrimiento geográfico de cada categoría de amenaza. En la Tabla 5.2 se presenta un esquema para la presentación de estos resultados.

Como se puede observar en la Tabla 5.2, se ha incluido un campo para la descripción de recomendaciones relacionadas con los requerimientos del Decreto 1807 de 2014 en las zonas de amenaza alta y media, en el cual a criterio de los expertos y con base en los resultados de los análisis se pueden mencionar posibles usos del suelo, implementación de prácticas y medidas para control de erosión, manejo de cultivos, conservación e incluso priorización de zonas para la elaboración de estudios detallados, entre otros. En las zonas de amenaza baja se pueden sugerir

también acciones dirigidas a mantener esta categoría o evitar que cambie a amenaza media o alta.

En la Tabla 5.3 se presenta un ejemplo de leyenda para la categoría de amenaza alta por movimientos en masa tipo deslizamiento.

La probabilidad espacial y temporal se debe describir para cada tipo de movimiento analizado en las categorías de amenaza, especificando el método utilizado y las fuentes de información, especialmente las relacionadas con los detonantes considerados.

La probabilidad espacial además debe estar acompañada con los siguientes indicadores:

- » Área de movimientos en masa para cada categoría de amenaza
- » Porcentaje de movimientos en masa para cada categoría de amenaza
- » Número de movimientos en masa por km<sup>2</sup> por cada categoría de amenaza.
- » Número de movimientos en masa en cada categoría de amenaza.

» **Tabla 5.2.** Esquema base para la elaboración de la leyenda del mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN DE LA CATEGORÍA DE AMENAZA (Estadísticas y localización geográfica)	TIPOS Y SUBTIPOS DE MOVIMIENTO	PROBABILIDAD ESPACIAL/ PORCENTAJE DE MOVIMIENTOS EN MASA	PROBABILIDAD TEMPORAL/ FRECUENCIA DE OCURRENCIA	MAGNITUD	RECOMENDACIONES
ALTA		Deslizamientos Caídas Flujos				
MEDIA		Deslizamientos Caídas Flujos				
BAJA		Descripción de las características asociadas con la baja probabilidad espacial y temporal a la ocurrencia de movimientos en masa				

Fuente: autores.

» **Tabla 5.3.** Ejemplo de leyenda para la categoría de amenaza alta por movimientos en masa tipo deslizamiento del municipio de Mocoa, Putumayo

CATEGORÍA	TIPOS Y SUBTIPOS DE MOVIMIENTO	DESCRIPCIÓN	RECOMENDACIONES
ALTA	Deslizamientos (incluye flujos y deslizamientos)	<p>Corresponde a zonas en las que se detonan de deslizamientos y flujos de tierra, debido a la condición débil de los materiales presentes, con pendientes mayores a 20°. Las áreas de los movimientos pueden ser predominantemente menores a 1000 m<sup>2</sup> y algunos pueden alcanzar hasta los 5000 m<sup>2</sup>.</p> <p>Para condiciones de lluvia similar al del 31 de marzo de 2017, es decir precipitaciones intensas precedidas de altas precipitaciones que saturan los materiales, cuya coincidencia corresponde a un período de retorno que oscila entre 25 y 50 años, se estima que se pueden presentar densidades hasta de 46 deslizamientos por km<sup>2</sup>.</p> <p>Esta categoría ocupa el 20,4% del área de estudio, cubriendo un área de 872 Ha (8.7 km<sup>2</sup>) principalmente en las veredas San Antonio, Las Palmeras, San Luis de Chontoyaco y en menor porcentaje en las veredas Caliyaco, Campucana, El Líbano, Guadales, La Reserva, Pueblo Viejo, Villanueva, Villarosa y Baldío Nacional. En la zona urbana esta categoría se presenta en la Urbanización Las Orquídeas y en el barrio La Reserva, margen izquierda de la vía nacional Mocoa-Pitalito.</p> <p>En esta zona se pueden presentar pérdida de vidas humanas, pérdida de cultivos o cabezas de ganado, al igual que el daño de obras civiles por la ocurrencia de los deslizamientos y flujos de tierra.</p>	<p>Proteger e incrementar la vegetación nativa en la zona de los nacimientos y orillas de las fuentes de agua, ríos y quebradas e impulsar programas de revegetación con especies nativas, en lo posible de bajo peso para evitar los movimientos de tierra por sobrecarga.</p> <p>En general, se recomienda adelantar proyectos de buenas prácticas agrícolas, delimitación de zonas de protección especialmente hacia las cuencas altas de los ríos.</p> <p>En las coberturas de pastos degradados se debe evitar que sean de nuevo usados para la ganadería y promover la regeneración natural y la repoblación vegetal multiestrato.</p> <p>En áreas ocupadas de este nivel de amenaza se recomienda evacuar las zonas actualmente inestables en las cuales se hayan identificado elementos expuestos cercanos, debido al carácter retrogresivo de los deslizamientos o a los procesos de avance de los mismos, que puedan llegar a afectarlos.</p> <p>Se recomienda condicionar el uso del suelo para los desarrollos de obras civiles en las zonas de amenaza alta por movimientos en masa. En estos casos se recomienda adelantar estudios geotécnicos detallados que definan medidas estructurales y no estructurales.</p> <p>Es importante mantener un monitoreo permanente en las zonas de amenaza alta, especialmente, en época de lluvia en las zonas donde hay elementos expuestos o en aquellas zonas donde se puedan generar represamientos en las cuencas medias y altas de los ríos.</p> <p>En el barrio La Reserva se recomienda respetar la zona de protección y evitar cualquier tipo de construcción que pueda generar inestabilidad en las laderas.</p> <p>En las zonas ya construidas es necesario realizar estudios detallados de estabilidad de taludes y adelantar las obras de mitigación correspondientes.</p>

Fuente: tomado de SGC (2017b).





6

# RECOMENDACIONES FINALES



# | Capítulo 6 |

Tomando como base los requerimientos técnicos presentados en la normatividad como el Decreto 1807 de 2014, relacionados con la presentación de resultados y requisitos de los profesionales que participan de la elaboración de este tipo de estudios, en los siguientes numerales se presentan recomendaciones generales relacionadas con los productos a obtener en un estudio de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000. Se recomienda que la presentación de mapas, así como el almacenamiento de información cartográfica, se ajuste a la estructura adoptada por el SGC (2015c).

## 6.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

---

Un estudio de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 debe incluir un informe técnico que contenga al menos los capítulos que se numeran a continuación:

1. Generalidades: se describe la información relacionada con el objetivo del estudio, la información geográfica del área de estudio, la información climática y la información secundaria disponible, a partir de la cual se debe elaborar una descripción detallada de los antecedentes y la situación de amenaza de la zona de estudio. Es importante elaborar un listado de información disponible, de la cual se obtienen las capas de información en los análisis posteriores.
2. Área de estudio e Información cartográfica básica: en este capítulo se describe la información primaria adquirida en relación con cartografía base, Modelos Digitales de Elevación, Imágenes de sensores remotos (fotografías aéreas, satelitales, etc.) y demás insumos relacionados. Es importante describir cualquier tipo de procesamiento aplicado y analizar la precisión y confiabilidad de la información utilizada en el estudio.
3. Caracterización Geoambiental: se deben presentar las características geológicas y ambientales del área de estudio, específicamente las relacionadas con la zonificación de amenaza por movimientos en masa. En este capítulo se incluyen las temáticas de inventario de procesos morfodinámicos, la geología y unidades geológicas superficiales, subunidades geomorfológicas, cobertura de la tierra y uso del suelo y factores detonantes. Cada una de las temáticas relacionadas con factores condicionantes (geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo) debe tener una memoria explicativa en la que se describa el proceso para la definición y elaboración de los mapas que sirven como insumos en la zonificación de amenazas, además de los respectivos mapas producto. Del análisis detallado del inventario de procesos morfodinámicos se debe plantear una hipótesis de falla en la que se describa la importancia de cada uno de los factores geoambientales considerados (o su combinación) en la ocurrencia de cada tipo de movimiento en masa analizado, de acuerdo con los escenarios de amenaza definidos para el área de estudio. Esta hipótesis será comprobada posteriormente con el análisis de susceptibilidad y amenaza. Igualmente, de este análisis se debe poder establecer a priori la posible evolución de los procesos de inestabilidad y futuros escenarios de amenaza, de acuerdo con las diferentes fuentes de información disponibles y la multitemporalidad de los productos.

4. Análisis de susceptibilidad: en este capítulo se debe presentar la metodología utilizada para el análisis de susceptibilidad por tipo de movimiento en masa. En este análisis se deben establecer las zonas susceptibles y su relación con las características geoambientales, de manera que se comprueben y validen las hipótesis planteadas (curvas de éxito), o se puedan replantear de acuerdo con el conocimiento del área de estudio. Se debe listar la importancia relativa de cada factor condicionante, en la posible ocurrencia de cada tipo de movimiento en masa y la posible evolución o escenarios posibles de amenaza de acuerdo con los resultados del análisis.
5. Análisis de detonantes: Se debe presentar toda la información disponible recopilada y utilizada para este análisis, haciendo énfasis en la utilizada para el cálculo de probabilidades y caracterización de los factores detonantes considerados.
6. Caracterización de la amenaza: como resultado del análisis del inventario de procesos morfodinámicos y del análisis de detonantes, cada categoría de susceptibilidad se debe caracterizar con análisis de tipos de procesos predominantes, probabilidad espacial y temporal de ocurrencia y magnitudes esperadas.
7. Conclusiones y recomendaciones: se describen los aspectos más relevantes en relación con los factores considerados, la metodología de trabajo y los resultados obtenidos. De acuerdo con el Decreto 1807 de 2014, los productos de zonificación de amenazas deben incluir, además de las características mencionadas en esta guía, análisis de posibles daños que se pueden generar, medidas de mitigación (estructurales y no estructurales) orientadas a establecer el modelo de ocupación del territorio y las restricciones o condicionamientos para el uso del suelo.
8. Referencias bibliográficas: se debe numerar toda la información bibliográfica consultada para la elaboración del estudio.
  - » Memoria explicativa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS). Escala 1:25.000.
  - » Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS). Escala 1:25.000.
  - » Memoria explicativa de Subunidades Geomorfológicas (SGMF). Escala 1:25.000.
  - » Mapa de Subunidades Geomorfológicas (SGMF). Escala 1:25.000.
  - » Memoria explicativa de unidades de cobertura de la tierra y uso del suelo. Escala 1:25.000.
  - » Mapa de cobertura de la tierra. Escala 1:25.000.
  - » Mapa de uso del suelo. Escala 1:25.000.
  - » Mapa de Inventario de Procesos Morfodinámicos. Escala 1:25.000.
  - » Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa. Escala 1:25.000.
  - » Mapa de amenaza por movimientos en masa. Escala 1:25.000.

En caso de ser necesario se puede también relacionar información de apoyo como:

- » Base cartográfica (formato digital).
- » Modelo digital de elevación.
- » Imágenes de sensores remotos.
- » Carteras de campo.
- » Formatos de inventario de movimientos en masa.
- » Registros de precipitación.

Para el almacenamiento de la información se puede tomar como base el “Estándar para la presentación y almacenamiento de productos de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa para planchas a escala 1:100.000” elaborado por el SGC en 2015, con los ajustes necesarios para incluir información adicional.

Con respecto a la presentación de mapas, en el Anexo 6.1 se presenta una propuesta en la que se especifica el contenido de los mapas, haciendo especial énfasis en la información relacionada con los insumos utilizados, las metodologías de cálculo, el análisis de datos y el alcance del mapa.

El informe técnico debe incluir con los respectivos mapas y anexos (en formato análogo y digital), entre los que se pueden mencionar:

## 6.2 PERFIL DE LOS PROFESIONALES

En el Decreto 1807 de 2014 se señala:

Los estudios técnicos deben ser elaborados y firmados por profesionales idóneos en las materias, quienes son responsables de los mismos sin perjuicio de la responsabilidad por la correcta ejecución de los diseños y las obras de mitigación.

Con el fin de orientar sobre la idoneidad de que trata la normatividad y con base en la experiencia del SGC en este tipo de estudios, a continuación se recomiendan algunos de los perfiles profesionales a tener en cuenta para la elaboración de estos estudios. Es importante aclarar que los perfiles relacionados se consideran básicos y no excluyen la posibilidad de considerar otros, siempre y cuando se cuente con experiencia en zonificación de amenazas por movimientos en masa.

- » Los profesionales que realicen, revisen o supervisen la cartografía temática de geología deben tener título profesional en Geología o Ingeniería Geológica, con experiencia profesional en temas relacionados con Geología aplicada a Ingeniería o cartografía de Unidades Geológicas Superficiales, preferiblemente con experiencia en la interpretación de imágenes de sensores remotos, específicamente fotointerpretación, al igual que conocimientos en herramientas SIG.
- » Los profesionales que realicen, revisen o supervisen la cartografía temática de geomorfología e inventario de movimientos en masa deben tener título profesional en Geología, Ingeniería Geológica, Geografía o afines, con experiencia profesional en temas relacionados con geomorfología a escala media o detallada, preferiblemente con experiencia en la interpretación de imágenes de sensores remotos, específicamente fotointerpretación, al igual que conocimientos en herramientas SIG.
- » Los profesionales que realicen, revisen o supervisen el componente de cobertura de la tierra y uso del suelo deben tener título profesional en Ingeniería Forestal, Ecología o Biología, o profesional en áreas afines a las Ciencias Naturales, con especialización en Geomática y/o Sistemas de Información Geográfica, con experiencia profesional en interpretación de imágenes de sensores remotos para el levantamiento de información de cobertura de la tierra y uso del suelo en diferentes escalas de estudio aplicando la metodología Corinne Land Cover.
- » Los profesionales que realicen, revisen o supervisen el Sistema de Información Geográfica (SIG) deben tener título profesional en Ciencias o Ingeniería, o en áreas afines a las ciencias de la tierra, con título de posgrado en áreas afines a los Sistemas de Información Geográfica.
- » Los profesionales que realicen, revisen o supervisen los análisis hidrológicos o hidráulicos para caracterización de la amenaza por movimientos en masa y avenidas torrenciales deben tener título profesional en Ingeniería Civil o Ingeniería Ambiental, con título de posgrado (especialista como mínimo) en hidrología, recursos hidráulicos o similares, con experiencia profesional en análisis estadísticos de datos hidrológicos y modelamiento de avenidas torrenciales, flujos de escombros, detritos o lodos.
- » Los profesionales que realicen, revisen o supervisen los análisis de antecedentes e inventario de procesos, análisis de susceptibilidad y análisis de amenaza por movimientos en masa deben tener título profesional en Geología, Ingeniería Geológica, Ingeniería Civil, Geografía o en áreas afines a las ciencias de la tierra, con título de posgrado en geotecnia o evaluación de riesgos geológicos.



**| ANEXOS**

## **Anexo 3.1**

# **INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS**

Este anexo presenta algunos criterios para la identificación y caracterización de movimientos en masa, tanto en el proceso de interpretación de imágenes de sensores remotos como en el levantamiento de campo. Estos criterios se compilaron e integraron con el objetivo de brindar una herramienta que facilite el levantamiento de la información de movimientos en masa como parte del inventario de procesos morfodinámicos propuesto en la *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000* y se resumen en cuatro tablas, las cuales corresponden a: características de los movimientos en masa en la interpretación de imágenes y levantamiento de campo, criterios para la determinación del estado de la actividad de un movimiento en masa, relación entre el estado de la actividad y edad relativa de un movimiento en masa y atributos del inventario de movimientos en masa.

## 1. CRITERIOS PARA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA

---

De acuerdo con la propuesta que se presenta en la *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000*, el inventario de procesos morfodinámicos incluye como principal elemento los movimientos en masa. Por tal razón, resulta de vital importancia realizar un adecuado proceso de identificación y caracterización de este tipo de procesos. Para ello, diferentes autores, como Dikau et al. (1996), Naranjo (2015), Suárez (1998), Trabuck & Lutgens (2005) y van Westen (2013), con base en sus propias experiencias en el tema, han planteado criterios para identificar los diferentes tipos de movimientos en masa con base en aspectos morfológicos del terreno, la vegetación, el drenaje y la variación de las pendientes del terreno.

En la Tabla 1 se presenta la compilación de los criterios propuestos por dichos autores en la identificación de los diferentes tipos de movimientos en masa considerados en el PMA: GCA (2007).

» **Tabla 1.** Características de movimientos en masa en la interpretación de imágenes y en el levantamiento de campo

CARACTERÍSTICAS DE MOVIMIENTOS EN MASA EN LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES Y EN EL LEVANTAMIENTO DE CAMPO				
TIPO DE MOVIMIENTO	MORFOLOGÍA	VEGETACIÓN	DRENAJE	PENDIENTE
DESIZAMIENTO <b>DESIZAMIENTO TRASLACIONAL (translational slide) EN ROCA Y SUELO</b>	<p>Corona controlada y articulada en deslizamientos de rocas, superficie plana, lisa; relativamente poco profundo (somero), el material superficial se desplaza sobre la capa de roca (<i>bedrock</i>); bastante ancho; la salida (<i>run-out</i>) con algo de vegetación con un relieve más bien irregular (caótico), con un decrecimiento en el tamaño de los bloques a medida que aumenta la distancia; inclinación de árboles o postes de electricidad en dirección de la pendiente (van Westen, 2013); grietas transversales y radiales en el cuerpo o paralelo a la corona, las cuales tienden a seguir la pendiente natural pudiendo mostrar desplazamiento vertical (Suárez, 1998); el escarpe principal es casi vertical en la parte superior y casi plano o inclinado suavemente en la parte inferior; escarpes bajos hacia los flancos con grietas verticales que usualmente divergen ladera abajo (Dikau et al., 1996).</p>	<p>El área de origen y la zona de tránsito se encuentran por lo general descubiertos; con frecuencia se presenta alineación de la vegetación en la misma dirección del transporte; se observan diferencias en la vegetación del cuerpo; en los deslizamientos de rocas no existe uso de la tierra en el cuerpo (van Westen, 2013).</p>	<p>Ausencia de estancamiento (<i>sag ponds</i>) por debajo de la corona; en el cuerpo el drenaje superficial es desordenado o está ausente; las corrientes son desviadas o bloqueadas por el lóbulo frontal (van Westen, 2013); en algunos casos se observa una línea de manantiales al pie del área convexa o frente del depósito (Naranjo, 2015).</p>	30° - 75°
DESIZAMIENTO <b>DESIZAMIENTO ROTACIONAL (rotational slide)</b>	<p>Corona con forma de media-luna y la parte frontal (pie) es lobulada; escarpe principal descubierta, casi vertical en la parte superior, cóncavo hacia el deslizamiento y comúnmente alto, pudiendo mostrar estrías y surcos en la superficie que corre de la corona al cuerpo del movimiento; en el cuerpo, cambios abruptos en la morfología de la pendiente, caracterizado por formas cóncavas (nicho) y convexas (lóbulo de salida); con frecuencia se observan pendientes en forma de grada (escalonada); facetas de la pendiente con declives inversos (<i>backtilting slope</i> – zonas de basculamiento); presencia de escarpes menores en diferentes partes del cuerpo; en las partes de deposición la morfología presenta formas onduladas tipo Hummocky; formación de <i>grabens</i> y <i>horsts</i> en el cuerpo del movimiento (Naranjo, 2015); grietas transversales y radiales en el cuerpo o paralelo a la corona, cuando dichas grietas se presentan en suelo o detritos son curvas y cóncavas hacia el movimiento (Suárez, 1998; Dikau et al., 1996); el cuerpo del movimiento puede presentar terreno con ondulaciones o montículos (tipo <i>hummocky</i>), así como huecos rellenos con detritos lavados y material orgánico del mismo cuerpo del movimiento; los flancos conforman escarpes altos que decrecen hacia el pie y presentan estrías con fuerte componente vertical cerca del escarpe principal y fuerte componente horizontal cerca del pie; el pie se presenta como una zona de levantamiento (abombamiento), con grietas transversales y crestas de presión transversales bajo la línea del pie (Dikau et al., 1996).</p>	<p>Contraste claro de la vegetación con sus alrededores; la ausencia de uso de la tierra es un indicador de la actividad; diferencias de vegetación de acuerdo a las condiciones de drenaje y humedad (van Westen, 2013); presencia de árboles inclinados generalmente hacia atrás (dirección contraria al movimiento) en el cuerpo del movimiento pero cerca del escarpe principal, mientras que cerca del pie se observan generalmente árboles inclinados hacia adelante (misma dirección del movimiento) (Dikau et al., 1996), inclinación de los troncos con distintas orientaciones, producidas por movimientos diferenciales dentro de la ladera.</p>	<p>Contraste con las laderas no falladas; mal drenaje superficial o acumulación en nichos o áreas de declive inverso (<i>backtilting slope</i> – zonas de basculamiento); filtración en la parte frontal del lóbulo de salida (<i>run-out lobe</i>) (van Westen, 2013). Encharcamientos (<i>sag ponds</i>) en el cuerpo del movimiento y sobre el pie del movimiento; línea de manantiales al pie del área convexa o frente del depósito (Naranjo, 2015).</p>	20° - 40°

(.../...)

(.../...)

		CARACTERÍSTICAS DE MOVIMIENTOS EN MASA EN LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES Y EN EL LEVANTAMIENTO DE CAMPO			
TIPO DE MOVIMIENTO		MORFOLOGÍA	VEGETACIÓN	DRENAJE	PENDIENTE
CAÍDAS	<b>CAÍDAS (<i>fall</i>)</b>	Paredes de roca ( <i>rockwall</i> ) o caras libres distinguibles, en asociación con pendientes de ladera (20° -30°) y conos de deyección; paredes de roca diaclasadas con canales de caída (van Westen, 2013); las áreas de caída de roca se pueden identificar por el color claro de los afloramientos rocosos en la parte alta de los escarpes y las manchas moteadas de los bloques de roca en la base de los escarpes (Suárez, 1998); el escarpe principal se dispone usualmente casi vertical, de forma irregular, descubierto y fresco, con diaclasas o fallas por cizalla en rocas y desprendimiento en la superficie de detritos o suelo; puede presentar superficies pulidas; se observan huecos curvos o con forma de cuña que evidencian los sitios de desprendimiento; la punta del movimiento presenta montones o pilas irregulares de detritos o talus si el movimiento es pequeño localizados en el pie del escarpe, así mismo puede tener un contorno redondeado y consiste en una cresta transversal ancha y curva si el deslizamiento es grande (Dikau et al., 1996). Las acumulaciones de material detrítico en los pies de las laderas tienen ángulos entre 25° y 35°, ángulo que está directamente relacionado con el ángulo de fricción interna de las partículas (Soeters & Westen, 1996).	Cicatrices lineales en la vegetación a lo largo de las rutas más frecuentes de la caída de las rocas. La densidad de la vegetación es baja en la ladera (van Westen, 2013). Impactos, ramas y troncos tronchados debido a la caída de bloques. La zona de depositación presenta una vegetación caracterizada por bajas densidades de árboles y arbustos, mientras más baja la densidad mayor es el grado de actividad de la ladera (Soeters & Westen, 1996).	Sin características específicas.	> 50°
	<b>VOLCAMIENTO (<i>toppling</i>)</b>	Cicatrices extremas largas (cóncavas) en las montañas, con bloques deslizados pendiente abajo de dimensiones casi geológicas; la base de los acantilados muestra estratos modificados o abultamiento del material, enormes rocas o columnas parcialmente rotas quedarán dispersas a lo largo de taludes menos inclinados. La textura será gruesa y abierta con amplios vacíos (Dikau et al., 1996).	Condiciones de vegetación muy irregulares/caóticas en partes acumuladas, ausente en la cicatriz (van Westen, 2013).	Drenaje superficial irregular y desordenado, con frecuencia afectando al valle y formándose un lago detrás del cuerpo (van Westen, 2013).	
FLUJOS	<b>FLUJOS DE TIERRAS (<i>earth flows</i>)</b>	Una concavidad grande o varias pequeñas, con relieve tipo hummocky en el área de origen; cicatrices principales y varias cicatrices pequeñas reflejan el tipo de falla del movimiento; la trayectoria sigue los canales del drenaje y el cuerpo llena el valle, contrastando con los valles en forma de V; la parte frontal es lobulada y convexa; micromorfología irregular con patrones relacionados con las estructuras de flujo (van Westen, 2013); también puede presentar crestas de material grueso a lo largo de la trayectoria recorrida, además abanicos bulbosos en la pata de las masas movilizadas (Dikau et al., 1996).	La vegetación en la cicatriz y el cuerpo contrasta fuertemente con los alrededores; el uso de la tierra es ausente si está activo; presenta un patrón lineal en la dirección del flujo (van Westen, 2013).	Acumulación frecuente en la parte cóncava superior del flujo; canales de drenaje paralelos a ambos lados del cuerpo en el valle; drenaje bloqueado o desviado por el lóbulo frontal (van Westen, 2013).	> 15° o 20° (Dikau et al., 1996).
	<b>FLUJO DE LODO (<i>mud flows</i>)</b>	Nicho someramente cóncavo, con una parte acumulativa plana lobulada; claramente más ancho que la ruta de transporte; la morfología irregular contrasta con las áreas de alrededor (van Westen, 2013); grietas transversales y radiales en el cuerpo o paralelo a la corona (Suárez, 1998). Es un flujo canalizado que puede incorporar agua superficial durante el movimiento, mayor fracción arcillosa en comparación con los otros tipos de flujos (PMA: GCA, 2007).	Se presenta un contraste claro en la vegetación, cuando es reciente o fresco (ausencia), cuando es antiguo se presentan coberturas de diferente tamaño, color e intensidad en la zona del cuerpo con relación a las áreas aledañas (van Westen, 2013). Inclinación de los árboles en el sentido de la pendiente, como resultado de movimientos de tipo flujo.	No se asocian grandes anomalías en el drenaje con los flujos de lodo ( <i>mudslides</i> ), aparte de problemas locales con el drenaje superficial o arroyos a ambos lados del cuerpo (van Westen, 2013).	25° y 40° (Dikau et al., 1996)

(.../...)

(.../...)

CARACTERÍSTICAS DE MOVIMIENTOS EN MASA EN LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES Y EN EL LEVANTAMIENTO DE CAMPO					
TIPO DE MOVIMIENTO	MORFOLOGÍA	VEGETACIÓN	DRENAJE	PENDIENTE	
FLUJOS	<b>DESIZAMIENTOS POR FLUJO (flow slide)</b>	Área de origen grande con forma de tazón (bowl shaped) con un relieve interno parecido a gradas o hummocky; relativamente con un gran ancho; el cuerpo despliega estructuras de flujo claras con una parte frontal lobulada convexa (como en los flujos de tierra); frecuentemente asociado con riscos (roca débil) o con los bordes de las terrazas (van Westen, 2013); grietas transversales y radiales en el cuerpo o paralelo a la corona (Suárez, 1998).	El patrón de la vegetación resalta la morfología de los escarpes y los bloques en el área de origen; vegetación altamente disturbada y diferenciada en el cuerpo (van Westen, 2013). Inclinación de los árboles en el sentido de la pendiente, como resultado de movimientos de tipo flujo.	Como en los flujos de tierra, acumulación o drenaje trastornado en la parte trasera y el drenaje es desviado o bloqueado por el lóbulo frontal (van Westen, 2013).	
	<b>FLUJO DE DETRITOS (debris flow)</b>	Gran cantidad de pequeñas concavidades (asociadas al sistema de drenaje) o un escarpe principal caracterizan el área de la fuente. Destrucción casi total a lo largo de la trayectoria, marcada a veces por diques deposicionales. Plano desolado llano, exhibiendo las estructuras vagas del flujo en el cuerpo (van Westen, 2013). El escarpe principal puede ser suavemente arqueado, circular o en forma de botella, con frecuencia largo, estrecho, estriado y tiene la parte superior con forma aserrada, dentada o en forma de V, también puede ser cóncavo hacia el movimiento; los flancos divergen en la misma dirección del movimiento; consiste en grandes bloques empujados a lo largo de una matriz de material más fino; tiene líneas de flujo; sigue patrones de drenaje; el cuerpo del movimiento es muy largo comparado con su amplitud; se extiende lateralmente en lóbulos; si está seco puede tener un frente empinado de aproximadamente un metro de altura (Dikau et al., 1996); rasgos característicos en sus depósitos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de u, trenes de bloques rocosos y grandes bloques individuales; pulsos con acumulación de bloques en el frente de onda (PMA: GCA, 2007).	Ausencia de vegetación en todas partes, la recuperación de la misma llevará muchos años.	Drenaje desordenado en el cuerpo; las corrientes originales han sido bloqueadas o desviadas por el movimiento.	
	<b>AVALANCHA DE DETRITOS (debris avalanches)</b>	Nichos relativamente pequeños y poco profundos en pendientes pronunciadas con una trayectoria lineal clara. Cuerpo frecuentemente ausente (erosionado por la corriente). No canalizado, con detritos saturados o parcialmente saturados. No presentan ordenamiento de la granulometría del material en sentido longitudinal, ni tampoco un frente de material grueso en la zona distal (van Westen, 2013; PMA: GCA, 2007).	El nicho y la trayectoria están denudados o cubiertos por vegetación secundaria.	Drenajes superficiales lineales pueden originarse en la trayectoria de la avalancha de detritos.	> 35°
<b>REPTACIÓN (creep)</b>	Ondulaciones y lóbulos bien definidos sobre el terreno en movimiento a manera de pliegues que a veces se traslapan (Dikau et al., 1996). No se distingue superficie de falla, movimiento lento a muy lento (PMA: GCA, 2007).	Inclinación de árboles en dirección de la pendiente, al igual que los cercados y los tendidos eléctricos y desplazamiento de los muros de contención (Tarbuck & Lutgens, 2005). Curvatura de la base de los troncos de los árboles y verticalidad de la parte superior, que indica movimiento en masa lento.	Por lo general, el suelo se presenta con altas concentraciones de humedad.	2° a 3° (Dikau et al., 1996)	

Fuente: autores.

## 2. ESTADO DE LA ACTIVIDAD Y EDAD RELATIVA DE UN MOVIMIENTO EN MASA

### 2.1 Estado de la actividad

Uno de los atributos importantes de un movimiento en masa que se consideran en la propuesta de la *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000*, es el estado de la actividad de un movimiento. De acuerdo con PMA: GCA (2007), el estado de la actividad de un movimiento:

Describe aquello que se sabe con respecto a la regularidad o irregularidad temporal del desplazamiento.

Con base en este concepto, Cruden & Varnes (1996) plantea cuatro tipos para el estado de la actividad de un movimiento en masa: activo, reactivado, suspendido e inactivo, este último se subdivide en latente, abandonado, estabilizado y

relicto. Sin embargo, para fines prácticos en la aplicación de la *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000*, se proponen dos tipos principales para el estado de la actividad: *activo* e *inactivo* y se adopta el concepto de PMA: GCA (2007), según el cual:

**Activo:** movimiento en masa que actualmente se está moviendo, bien sea de manera continua o intermitente.

**Inactivo:** estado de actividad de un movimiento en masa en el cual la masa de suelo o roca actualmente no presenta movimiento, o que no presenta evidencias de movimientos en el último ciclo estacional.

Para determinar si un movimiento en masa se encuentra activo o inactivo, Dikau et al. (1996) plantea algunos criterios morfológicos que pueden ser aplicados en interpretación de imágenes de sensores remotos y en el levantamiento de campo, los cuales se presentan en la Tabla 2.

» **Tabla 2.** Criterios morfológicos para determinar el estado de la actividad general de un movimiento en masa

ESTADO DE LA ACTIVIDAD
<b>MOVIMIENTO ACTIVO</b>
1. Presencia de escarpes y fracturas abiertas con bordes agudos. Sin relleno secundario.
2. Las partes principales del movimiento muestran fracturas secundarias y crestas de presión.
3. Se observan superficies pulidas, con estrías, de apariencia fresca.
4. Drenaje caótico (sin patrón definido), encharcamientos ( <i>sag ponds</i> ).
5. No hay desarrollo de suelo y sólo se observa vegetación de rápido crecimiento.
6. Considerable distinción de la morfología, rugosidad, textura de la superficie y vegetación, entre el área del movimiento y el área no deslizada.
7. Vegetación inclinada.
<b>MOVIMIENTO INACTIVO</b>
1. Escarpes y fracturas meteorizadas de difícil identificación, grietas rellenas.
2. Sin fallas secundarias ni crestas de presión.
3. Superficies meteorizadas y vegetadas.
4. Drenaje integrado pero puede tener patrón irregular y repentinas depresiones rellenas.
5. Desarrollo de suelo bien vegetado o cultivado.
6. Difícil distinción de la geometría y textura de la superficie a excepción de fotografías aéreas.
7. Nuevo crecimiento en los árboles y crecimiento vertical de los mismos posterior al movimiento.

Fuente: Tomado y traducido de Dikau et al. (1996).

## 2.2 Edad relativa

Con respecto a la edad relativa de un movimiento en masa, McCalpin (1984) hizo un recuento de este concepto, en el que plantea que antes de los años 60 sólo se usaban los términos activo, fósil o antiguo para referirse a la edad de un movimiento en masa. En los años 60 y 70, se comenzaron a emplear términos más descriptivos para indicar la edad de un movimiento en masa, pero estos se usaban informalmente en diferentes trabajos a nivel general, inventarios regionales de movimientos en masa y en investigaciones de deslizamientos en áreas puntuales (Tabla 3). Sin embargo, después de la década de 1970, varios autores se basaron en edades absolutas para definir las diferentes clases de edades de un movimiento en masa, lo cual, con frecuencia es difícil de averiguar, especialmente cuando se realiza un inventario de movimientos en masa. Es así como McCalpin (1984) hizo una propuesta en la que relaciona el estado de la actividad con la edad relativa, dando como resultado cuatro clases: activo (históricos), inactivo-reciente, inactivo-maduro e inactivo-antiguo. Para definir cada una de estas clases, este autor se basó en el análisis de las características morfológicas de un movimiento en masa y el cambio que estas han sufrido debido a la acción del clima traducida en procesos denudacionales (meteorización y erosión) a lo largo del tiempo. Este autor considera que es difícil conocer la edad absoluta de un movimiento en masa, pues el tiempo transcurrido (en términos de años) para que se produzcan modificaciones de la morfología inicial del movimiento debido a los procesos denudativos, puede variar de una región a otra dependiendo de las condiciones climáticas propias o particulares. Es decir que en el transcurso de un año

en una región con ciertas condiciones de clima (altas precipitaciones), meteorización y erosión, un movimiento en masa puede sufrir cambios drásticos en su morfología, mientras que en otra región con diferentes condiciones y durante la misma ventana de tiempo, un movimiento similar puede no presentar mayores cambios.

Así mismo, Vargas (2000) planteó tres clases de edad relativa: reciente, antiguo y fósil. Cada una de ellas se define con base en evidencias morfológicas que puedan ser observadas en el movimiento y que indiquen cambios morfológicos significativos en este a lo largo del tiempo.

Considerando lo anterior, la *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000* propone tres clases de edad relativa para un movimiento en masa: reciente, antiguo y relicto (fósil), cuya distinción se hará con base en la identificación de rasgos o características morfológicas en el movimiento que permitan deducir el efecto e intensidad de los procesos denudacionales sobre este a través del tiempo, lo que se evidencia en el grado de modificaciones sufridas en su morfología inicial. La identificación de dichas características morfológicas puede realizarse mediante interpretación de imágenes de sensores remotos, levantamiento de campo o a partir de ambos métodos.

Los conceptos de reciente, antiguo y relicto se presentan en la Tabla 4, en donde también se establece una relación de estas clases de edad relativa con el estado de la actividad, encontrando que pueden existir movimientos en masa recientes activos e inactivos, movimientos en masa antiguos activos e inactivos y movimientos en masa relictos que son inactivos. Dicha tabla se construyó de acuerdo con el documento de Turner & Schuster (1996).

» **Tabla 3.** Terminología de clasificaciones previas de la edad relativa

AUTOR	FECHA	CLASIFICACIÓN
Varios (europeos)	1940 - 1970	Activo, antiguo o fósil
Shroder	1967, 1971	Joven, maduro, antiguo (con modificadores temprano y tardío)
Leighton	1976	Activo, recientemente activo e inactivo
Berkland	1977	Activo (10 años), reciente (10 - 100 años), antiguo (100 - 1000 años), muy antiguo (1000 - 10000 años), viejo (10000 - 70000), prewisconsiniano (70000-300000 años), precuaternario (>300000 años)
Varnes	1978	Activo (moviéndose actualmente), suspendido (>1 año), inactivo (>1 año); el inactivo puede ser latente (potencial de movimiento) o estabilizado (sin potencial de movimiento)
McCalpin	1984	Activo (histórico), inactivo - reciente, inactivo-maduro, inactivo-antiguo

Fuente: Tomado y traducido de McCalpin, 1984.

» **Tabla 4.** Relación entre edad relativa y estado de la actividad de un movimiento en masa

	EDAD RELATIVA	ESTADO DE LA ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
RECIENTE	Movimiento en masa (MM) que ha sido identificado mediante cambios morfológicos en imágenes cuyas fechas de adquisición son las más recientes dentro del intervalo de tiempo de la fotointerpretación multitemporal, o que sus características morfológicas se encuentran frescas, de manera que facilitan la identificación de su mecanismo en campo.	Activo	Un Movimiento en Masa (MM) es reciente y activo cuando sus condiciones de equilibrio (fuerzas resistentes no son superadas por las fuerzas actuantes) se encuentran al límite, pudiendo ser fácilmente alterables bajo la acción de un agente externo como la lluvia, sin llegar a constituir un evento extremo. Se puede considerar que un movimiento es activo si en el análisis multitemporal se evidencia que las condiciones de equilibrio mencionadas han cambiado a través del tiempo (detectando rasgos morfológicos indicativos de actividad expuestos en la Tabla 2). Así mismo, si en el análisis multitemporal y/o en el levantamiento en campo, se pueden identificar cambios morfológicos en diferentes épocas y las características actuales del movimiento están bien definidas y frescas (de acuerdo con los criterios de actividad presentados en la Tabla 2). Considerando la propuesta de PMA: GCA (2007) se pueden incluir dentro de los movimientos activos, tanto los reactivados como los suspendidos.
		Inactivo	Un MM es reciente e inactivo cuando presenta condiciones de equilibrio que no son fácilmente alterables en el tiempo, por lo cual, requiere de una intensidad específica y considerable en la acción de agentes externos como la precipitación y la sismicidad, que puedan generar un desequilibrio en dichas condiciones y producir una reactivación del mismo. No se presentan rasgos geomorfológicos en la fotointerpretación o levantamiento de campo que evidencien actividad (de acuerdo con los criterios de actividad presentados en la Tabla 2). De acuerdo con la propuesta de PMA: GCA (2007), como movimientos inactivos se consideran también los latentes, abandonados y estabilizados.
ANTIGUO	Se considera que un movimiento en masa es antiguo si en el análisis multitemporal fue identificado en las imágenes más antiguas disponibles o es un MM existente, incluso desde épocas anteriores a la fecha de la imagen más antigua disponible.	Activo	Se considera que un movimiento en masa antiguo se encuentra activo si en el análisis multitemporal o en el levantamiento de campo presenta evidencias de reactivación (de acuerdo con los criterios de actividad presentados en la Tabla 2). También se considera activo si dentro del proceso de fotointerpretación multitemporal se han registrado ciclos de actividad e inactividad para dicho movimiento.
		Inactivo	Un movimiento en masa antiguo es inactivo cuando en la fotointerpretación multitemporal o en el levantamiento de campo no presenta evidencias de cambios morfológicos y sus rasgos característicos son enmascarados por la vegetación (y en algunos casos por la acción antrópica), que cubre o modela las áreas afectadas y hace difícil su clasificación en términos de mecanismo o edad relativa.
RELICTO	Un movimiento en masa es relicto cuando sus características morfológicas son difusas, las condiciones geambientales que lo originaron son diferentes a las actuales y la posibilidad de que dichas condiciones vuelvan a presentarse son muy bajas.	Inactivo	Un movimiento relicto se considera inactivo pues sus evidencias morfológicas (de acuerdo con los criterios de actividad presentados en la Tabla 2) permiten deducir que dicho movimiento en masa ocurrió debido a condiciones específicas y la acción de agentes externos durante eventos extremos de baja recurrencia. La masa deslizada o zona de depósito aparece compacta, desarrolla suelos residuales u orgánicos espesos que se encuentran altamente meteorizados y alterados. En las zonas escarpadas únicamente se reconoce la cicatriz de la zona de arranque.

Fuente: Tomado y adaptado de Turner & Schuster (1996); Vargas C. (2000).

### 3. ATRIBUTOS DEL INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA

El inventario de movimientos en masa, como parte del inventario de procesos morfodinámicos propuesto en la *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa*

*Escala 1:25.000*, debe reunir una serie de atributos que permitan conocer información relevante sobre cada uno de los movimientos en masa, de tal manera que se pueda caracterizar cada uno de ellos. Los atributos que deben conformar el inventario de movimientos en masa, tanto para aquellos movimientos representados cartográficamente como polígono o como punto, se presentan en la Tabla 5.

» **Tabla 5.** Atributos del inventario para movimientos en masa cartografiados como polígono

CAMPO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN*	TIPO	DOMINIO	EJEMPLO
ENCUESTAD	ENCUESTADOR	Nombre(s) de la persona(s) que recopila los datos bien sea en campo, oficina o en ambos.	2,3,4	Texto (50)		Jorge Leonardo Chaparro Córdón
ID_MOV	IDENTIFICADOR DEL MOVIMIENTO EN MASA	Corresponde al identificador principal del movimiento en masa levantado en campo o en la fotointerpretación. Se sugiere que sean dos letras (las iniciales del encuestador) seguidas de tres dígitos numéricos.	2,3,4	Texto (5)	ⒶⒷ####	JC001
COD_SIMMA	CÓDIGO SIMMA	Este campo sólo será diligenciado si la información del movimiento en masa fue cargada al SIMMA. Corresponde al código asignado por dicho aplicativo al movimiento en masa inventariado.	N.A.	Número entero	#####	21435
FECHA_REP	FECHA DE REPORTE DEL MOVIMIENTO EN MASA	Corresponde a la fecha en que se inventarió el movimiento en masa. No se debe confundir con la fecha de ocurrencia del movimiento en masa.	2,3,4	Fecha		dd/mm/aaa
FECHA_MOV	FECHA DE OCURRENCIA DEL MOVIMIENTO EN MASA	Fecha de ocurrencia del movimiento en masa. Si no se tiene conocimiento de la fecha de ocurrencia del movimiento en masa, entonces se asignará la fecha de la imagen de sensor remoto más antigua en la cual fue identificado el movimiento. En cualquier otro caso, se debe asignar la misma fecha de reporte.	1,2,3,4	Fecha		dd/mm/aaa
FTE_INFSEC	FUENTE DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	Nombre de las imágenes interpretadas o de los estudios a partir de los cuales se levantó el movimiento en masa. Es necesario indicar la fecha de la fuente respectiva. Nota: en algunos estudios técnicos, puede obtenerse directamente la fecha del movimiento en masa. Para algunos estudios técnicos cuyo título sea muy extenso, se debe escribir sólo la cita bibliográfica (autor y año) e incluirla en las referencias del informe escrito.	2,3,4	Texto (250)		SPOT-5 (2005), Landsat 7 (2001), Foto aérea (Vuelo C-2345 año 1995), Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón (SGC, 2009)
DPTO	DEPARTAMENTO	Departamento donde se localiza el movimiento.	1,2,3,4	Texto (30)		Santander
PLANCHA	PLANCHA	Número de la plancha escala 1:25.000.	2,3,4	Texto (10)	####ⒶⒷ	120IIA
MUNICIPIO	MUNICIPIO	Municipio donde se localiza el movimiento.	1,2,3,4	Texto (50)		Bucaramanga
REF_GEOGRF	REFERENTE GEOGRÁFICO	Debe indicar algún accidente geográfico cercano o del mismo lugar de ocurrencia del movimiento en masa, que permita establecer su localización.	1,2,3,4	Texto (250)		Km 4 de la vía que conduce de Bucaramanga a Cúcuta

(.../...)

(.../...)

CAMPO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN*	TIPO	DOMINIO	EJEMPLO
<b>VEREDA</b>	VEREDA	Vereda en la que se localiza el movimiento.	1,2,3,4	Texto (50)		El Gualito
<b>PARTE</b>	PARTE DEL MOVIMIENTO EN MASA	Corresponde a la parte del movimiento identificada. Para el escarpe principal o zona de inicio se utiliza la letra (e) y para la zona de depósito o cuerpo del movimiento la letra (d). En el caso en que no se pueda identificar ninguna de las partes del movimiento se utiliza la letra (n).	e, d, n	Texto (1)	ε	e
<b>ID_PARTE</b>	IDENTIFICADOR DE LA PARTE DEL MOVIMIENTO EN MASA	Corresponde al identificador del polígono de cada una de las partes que conforman el movimiento en masa (escarpe y cuerpo). Se propone numerarlas en forma consecutiva. Ejemplo: el movimiento con ID_MOV JC001, en el cual se han identificado dos escarpes y un cuerpo, está conformado por tres polígonos identificados como JC001-1, JC001-2 y JC001-3.	2, 3, 4	Texto (7)	εε###-#	JC001-1
<b>ETIQUETA</b>	INICIALES RELACIONADAS CON EL TIPO DE MOVIMIENTO EN MASA	Letras que indican el tipo y subtipo de movimiento en masa de acuerdo con la Tabla 3.6 del documento guía. Este puede ser acompañado de una letra que identifique la parte del movimiento en masa.				
<b>ESTE_ESC</b>	ESTE - ESCARPE	Coordenada Este (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono correspondiente al escarpe del movimiento en masa (no aplica para avenidas torrenciales y reptación).	2,3,4	Número decimal	>0	847245
<b>NORTE_ESC</b>	NORTE - ESCARPE	Coordenada Norte (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono correspondiente al escarpe del movimiento en masa (no aplica para avenidas torrenciales y reptación).	2,3,4	Número decimal	>0	984144
<b>ESTE_CUERP</b>	ESTE - CUERPO	Coordenada Este (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono que corresponde al cuerpo del movimiento (zona de depósito).	3,4	Número decimal	>0	847245
<b>NORT_CUERP</b>	NORTE - CUERPO	Coordenada Norte (Magna Sirgas origen Bogotá) del centroide del polígono que corresponde al cuerpo del movimiento (zona de depósito).	3,4	Número decimal	>0	984144
<b>ESTE</b>	ESTE	Coordenada Este del centroide del movimiento (Magna Sirgas origen Bogotá). Este campo se diligencia en el caso que no sea posible diferenciar las partes de un movimiento en masa.	3,4	Número decimal	>0	847245
<b>NORTE</b>	NORTE	Coordenada Norte del centroide del movimiento (Magna Sirgas origen Bogotá). Este campo se diligencia en el caso que no sea posible diferenciar las partes de un movimiento en masa.	3,4	Número decimal	>0	984144
<b>ALTITUD</b>	ALTITUD	Valor de altitud del movimiento en metros sobre el nivel del mar (msnm).	3,4	Número entero	>0	2650
<b>TIPO_MOV1</b>	TIPO DE PRIMER MOVIMIENTO EN MASA	Tipo del primer movimiento en masa (caída, volcamiento, deslizamiento traslacional y rotacional, propagación lateral, reptación, flujo, deformaciones gravitacionales y sin clasificar).	2,3,4	Texto (50)		Deslizamiento
<b>TIPO_MOV2</b>	TIPO DE SEGUNDO MOVIMIENTO EN MASA	Esta casilla se diligencia en el caso en que se identifique más de un tipo de mecanismo en el mismo movimiento.	2,3,4	Texto (50)		Flujo

(.../...)

(.../...)

CAMPO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN*	TIPO	DOMINIO	EJEMPLO
<b>SUBTIPO_1</b>	SUBTIPO DE PRIMER MOVIMIENTO EN MASA	Subtipo de movimiento en masa de acuerdo al PMA-GCA, 2007.	2,3,4	Texto (50)		Deslizamiento Rotacional
<b>SUBTIPO_2</b>	SUBTIPO DE SEGUNDO MOVIMIENTO EN MASA	Esta casilla se diligencia en el caso en que se identifique más de un subtipo de mecanismo en el mismo movimiento.	2,3,4	Texto (50)		Flujo de tierra
<b>ACTIVIDAD</b>	ACTIVIDAD	Define si el movimiento se encuentra activo o inactivo.	3,4	Texto (8)	ACTIVO/ INACTIVO	Activo
<b>ESTILO</b>	ESTILO	Describe la manera como diferentes movimientos dentro de la masa desplazada contribuyen al movimiento total de esta, según PMA: GCA (2007), los estilos pueden ser: complejo, compuesto, múltiple, sucesivo o único.	3,4	Texto (10)		Compuesto
<b>DISTRIBUC</b>	DISTRIBUCIÓN	Definir el tipo de distribución del movimiento en masa de acuerdo con lo que se presenta en el formato de inventario y en el PMA: GCA, 2007.	3,4	Texto (30)		Retrogresivo
<b>LITOLOGÍA</b>	LITOLOGÍA	Litología de la zona del movimiento.	3,4	Texto (100)		Suelo residual cohesivo de arcillolitas muy fracturadas de la Formación Umir
<b>DIRECCIÓN</b>	DIRECCIÓN	Azimut de la dirección del deslizamiento.	3,4	Número entero	1-360	280
<b>LONGITUD</b>	LONGITUD	Longitud del movimiento en metros. No aplica para movimientos tipo caída de roca y volcamiento.	3,4	Número decimal	>0	95
<b>ANCHO</b>	ANCHO	Ancho del movimiento en metros. No aplica para movimientos tipo caída de roca y volcamiento.	3,4	Número decimal	>0	32
<b>PROF</b>	PROFUNDIDAD DEL MOVIMIENTO	Movimiento superficial o profundo. Solo aplica para deslizamientos y reptación.	4	Texto (10)	Superficial/ Profundo	Profundo
<b>ESPESOR</b>	ESPESOR	Espesor de la masa desplazada por el movimiento, en metros. Solo aplica para deslizamientos y flujos.	4	Número decimal	>0	12
<b>TAM_BLOQUE</b>	TAMAÑO DE BLOQUES	Diámetro promedio en metros del fragmento de roca más grande en un movimiento en masa tipo caída.	4	Número decimal	>0	3
<b>ÁREA_M</b>	ÁREA DEL MOVIMIENTO EN MASA	Área del movimiento en masa en m <sup>2</sup> . En el caso de movimientos tipo caída, se registra el área del cuerpo (zona de depósito), para los demás tipos de movimientos se registra el área total del polígono (escarpe + cuerpo).	3,4	Número decimal	>0	1254
<b>VOLUMEN</b>	VOLUMEN	Volumen en m <sup>3</sup> del material desplazado por el movimiento en masa. No aplica para reptación.	3,4	Número decimal	>0	1000
<b>COB_USO</b>	COBERTURA Y USO	Se debe indicar el tipo de cobertura de la tierra y tipo de uso del suelo que predomina en el área de ocurrencia del movimiento, enfocándose en sus características precedentes. Se recomienda usar la terminología que se presenta en el formato de inventario.	3,4	Texto (100)		Cultivos/Agrícola

(.../...)

CAMPO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN*	TIPO	DOMINIO	EJEMPLO
AN_GMF	ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO SUBJETIVO	Describir brevemente las características de la geoforma (a nivel de ladera), en la cual se encuentra localizado el movimiento en masa, que permitan establecer su categoría de susceptibilidad: baja, media, alta y muy alta.	3,4	Texto (100)		Ladera erosiva altamente disectada, con pendiente abrupta. Susceptibilidad alta.
IMPORTANC	IMPORTANCIA DEL MOVIMIENTO EN MASA	La importancia del movimiento en masa se refiere a la calificación subjetiva de la severidad de los efectos adversos causados por el movimiento en masa.	2,3,4	Texto (5)	Alta, Media y Baja	Alta
ELEM_EXPUE	ELEMENTOS EXPUESTOS	Identificar el tipo de elemento afectado por la ocurrencia del movimiento en masa, empleando los términos definidos en el ítem "tipo de daños" del formato de inventario.	3,4	Texto (100)		Infraestructura/ institución educativa
DAÑO	DAÑO	Tipos de daños de acuerdo con el formato de inventario: leve, moderado, severo y no cuantificable.	1,2,3,4	Texto (100)		Moderado
AME_POT	AMENAZA POTENCIAL	Corta descripción de posible afectación, referida a generación de represamientos y/o bloqueos parciales o totales de cauces por aporte de material, afectación a infraestructura, población, actividades económicas y al medio ambiente.	3,4	Texto (100)		Posible represamiento del río Tona.
VERIF_CAM	VERIFICACIÓN DE CAMPO	Define si el movimiento fue verificado en campo. En caso de no tener verificación de campo, se asume que la información se obtuvo a partir de una fuente de información secundaria.	4	Texto (2)	SI/NO	Sí
OBSERVAC	OBSERVACIONES	Información complementaria de las características descritas anteriormente.	2,3,4	Texto (250)		Deslizamiento traslacional sobre laderas estructurales que conforman un flanco del sinclinal del Picacho

Fuente: autores.

**Anexo 3.2.2**  
**UNIDADES GEOLÓGICAS**  
**SUPERFICIALES (UGS)**

En este anexo se presentan algunos criterios para la descripción y caracterización en campo de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), con el objetivo de estandarizar algunos de los datos a tener en cuenta para su definición. Estos criterios están acompañados de formatos propuestos por el SGC para la toma de datos en campo (Formatos 1 y 2 al final de este documento).

Para la construcción de esta guía de campo se ha tomado como principal referente el documento “*Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geológica para Ingeniería Volumen II*”, del proyecto: “*Zonificación Geomecánica de la Sabana de Bogotá*” ejecutado por INGEOMINAS (2004). En esta guía se presentan los conceptos más relevantes en cuanto a su aplicación en la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25000. Sin embargo, no se excluyen los demás parámetros y características recomendados en INGEOMINAS (2004) para la caracterización de las UGS.

Este documento se basa en terminología comúnmente utilizada en ingeniería, enfocada en la definición de características indicativas que, dependiendo de la escala de análisis, pueden ser complementadas con resultados de laboratorio.

## 1. CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES DE ROCA

---

De acuerdo con Selby (1993) una roca es un material compuesto de granos minerales y cristales estrechamente unidos entre sí mediante sustancias cementantes y entramamiento de cristales;

es una sustancia dura, elástica que no se ablanda significativamente al ser sumergida en agua; si se considera como un macizo rocoso, es un material discontinuo con fracturas y otras discontinuidades que lo dividen en bloques individuales, estas discontinuidades controlan en gran medida la resistencia del macizo ante las fuerzas que actúan sobre este. Desde el punto de vista ingenieril cada tipo de roca tiene unas propiedades generalmente definidas por su resistencia, densidad o peso específico, compresibilidad y deformabilidad, porosidad y permeabilidad.

En el ámbito de la geología para ingeniería y la geotecnia, es común emplear el término *macizo rocoso*, el cual, según González de Vallejo et al. (2002) es aquel que está compuesto por una *matriz rocosa* constituida por un material geológico que tiene un origen y una composición a la cual se asocian propiedades como dureza, resistencia, alterabilidad y grado de meteorización. El macizo también incluye el conjunto de discontinuidades, el patrón estructural y el índice de fracturamiento, entre otros, que afectan la matriz rocosa.

Este apartado se enfoca en la descripción de criterios mínimos para la caracterización de las unidades de roca en función de la matriz rocosa y el análisis de calidad del macizo rocoso a partir del Índice Geológico de Resistencia (*GSI: Geological Strength Index*), sin restringir la posibilidad de que a criterio experto se puedan clasificar los macizos rocosos con otros métodos y toma de datos según la metodología propuesta por INGEOMINAS (2004). Finalmente es importante mencionar que para realizar la caracterización de unidades de roca se puede utilizar como ayuda el Formato 1 (anexo al final de este documento).

## 1.1 Caracterización de la matriz rocosa

La matriz rocosa corresponde a la roca intacta tal como se observa en el terreno, constituida por un conjunto de bloques ensamblados a lado y lado de los planos de debilidad que conforman las discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002).

Los aspectos que deben describirse de una matriz rocosa son:

- » Composición mineralógica y clasificación genética
- » Tamaño y forma de los granos
- » Color
- » Grado de meteorización o alteración
- » Dureza o resistencia a la compresión simple obtenida con pruebas de campo
- » Disposición estructural

Observaciones más detalladas incluyen aspectos texturales como el color de la roca, la forma y el tamaño de los granos, el grado de redondeamiento y esfericidad, la porosidad y permeabilidad, el tipo de cemento y matriz, entre otros, que también proporcionan criterios para determinar el comportamiento ingenieril de las rocas.

### 1.1.1 Composición mineralógica y clasificación genética

La composición mineralógica permite clasificar litológicamente la roca y determinar su origen. El sistema más utilizado en ingeniería se basa en clasificaciones geológicas enfocadas hacia usos geotécnicos (Tabla 1).

### 1.1.2 Tamaño y forma de los granos

La forma puede ser descrita haciendo referencia a la forma general de las partículas que conforman la matriz rocosa, su angularidad (que indica el grado de redondeamiento en los bordes y esquinas de los granos) y sus características superficiales (liso o áspero al tacto) (Dearman, 1991).

La estimación del tamaño de grano se realiza normalmente de manera visual. Para la descripción del tamaño de los granos, es adecuado emplear los mismos términos descriptivos utilizados para suelos.

Los términos utilizados y los intervalos de tamaño reconocidos internacionalmente son los indicados en la Tabla 2. En la Tabla 3 se presentan los términos utilizados para la descripción de la forma, angularidad y características superficiales de los granos.





» **Tabla 2.** Clasificación del tamaño de grano en las rocas

TÉRMINO	TAMAÑO DE GRANO EN ROCAS (mm)	EQUIVALENCIA CON TIPO DE SUELO
Grano muy grueso	> 60	Cantos y guijarros
Grano grueso	2 - 60	Gravas
Grano medio	0,06 - 2	Arenas
Grano fino	0,002 - 0,06	Limos
Grano muy fino	< 0,002	Arcillas

Fuente: tomado y traducido de Dearman (1974).

» **Tabla 3.** Términos usados en la descripción de la forma de los granos (partículas)

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
<b>Forma</b>	Equidimensional
	Plana
	Elongada
	Plana y elongada
	Irregular
<b>Angularidad</b>	Subangular
	Subredondeado
	Redondeado
<b>Características superficiales</b>	Áspero
	Liso

Fuente: tomado y traducido de IAEG (1981).

### 1.1.3 Color

El color de las rocas se puede describir de manera semejante al de los suelos, dando un color principal seguido de uno secundario e indicando por último la intensidad que presentan. Por ejemplo, “diabasa de color verde oscuro”. Para la descripción del color de las rocas se recomienda utilizar la carta de colores de rocas de Munsell (Munsell® Rock Color Chart).

### 1.1.4 Estado de meteorización

El estado de meteorización es importante en la descripción de la matriz rocosa para aplicaciones de ingeniería, porque condiciona de forma definitiva sus propiedades físicas y mecánicas (Dearman, 1991). Según avanza el proceso de meteorización, aumentan la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia debido a que muchos minerales se transforman en arcillas. Los efectos de la meteorización pueden describirse en términos de decoloración, descomposición química o desintegración física. La magnitud de estos efectos particulares de la meteorización puede subdividirse empleando términos de calificación como, por ejemplo, altamente descompuesta, ligeramente desintegrada, extremadamente descolorida, entre otros.



Con base en los cambios mecánicos y químicos observados en la matriz rocosa, puede establecerse un esquema descriptivo para los grados de meteorización (Tabla 4).

### 1.1.5 Resistencia

La resistencia de la matriz rocosa puede ser estimada en el afloramiento mediante índices de campo o a partir de correlaciones con datos pro-

porcionados por sencillos ensayos de campo, como el ensayo de carga puntual (*PLT: Point Load Test*) o el martillo Schmidt. Los índices de campo permiten una estimación del rango de resistencia de la roca. Los criterios para su identificación aparecen descritos en la Tabla 5, y deben ser aplicados sobre la roca una vez removida la capa de alteración superficial.

» **Tabla 4.** Esquema descriptivo de los grados de meteorización de la matriz rocosa

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
<b>Fresca</b>	No hay señales visibles de meteorización en la matriz rocosa
<b>Descolorida</b>	El color del material fresco original de la roca cambió y es evidencia de la meteorización. Debe indicarse el grado de cambio del color original. Si el cambio de color se limita a constituyentes minerales particulares, debe mencionarse
<b>Descompuesta</b>	Roca meteorizada a la condición de un suelo en el cual la fábrica original del material todavía se mantiene intacta, pero algunos o todos los granos minerales se encuentran descompuestos
<b>Desintegrada</b>	Roca meteorizada a la condición de un suelo en el cual la fábrica original del material se encuentra intacta. Roca friable, pero los granos minerales no están descompuestos del todo

Fuente: tomado y traducido de Dearman (1991).

» **Tabla 5.** Índices de campo para determinar la resistencia a la compresión simple, de suelos cohesivos y rocas a partir de índices de campo

CLASE	DESCRIPCIÓN	IDENTIFICACIÓN EN CAMPO	APROXIMACIÓN AL RANGO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)
S1	Suelo muy blando	El puño penetra fácilmente varios cm	< 0,0025
S2	Suelo blando	El dedo penetra fácilmente varios cm	0,0025 – 0,05
S3	Suelo firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo	0,05 – 0,10
S4	Suelo rígido	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo	0,10 – 0,25
S5	Suelo muy rígido	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0,25 – 0,50
S6	Suelo duro	Se marca con dificultad al presionar con la uña	> 0,50
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0,25 – 1
R1	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente	1 – 5
R2	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con navaja se talla con dificultad	5 – 25
R3	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse	25 – 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla	50 – 100
R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes del martillo para fracturarla	100 – 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas	> 250

Fuente: tomado y traducido de ISRM (1981).

### 1.1.6 Textura y estructura

La textura de la roca se refiere a los granos individuales y a su arreglo, este último puede mostrar alguna orientación preferencial. Los términos utilizados con más frecuencia incluyen: cizallada, clivada, exfoliada, masiva, bandeamiento de flujo, veteadas, porfírica y homogénea, entre otros. Las rocas sedimentarias se presentan en estratos que pueden ser regulares, laminares, con laminación cruzada o diferenciada. Los planos de estratificación pueden ser lisos, ondulados o cuarteados. De acuerdo con INGEOMINAS (2004), se presenta la Tabla 6, la cual muestra la

clasificación de las rocas con relación a su textura y estructura; además se incluyen las rocas de falla o brechas de falla y, con base en Coe et al. (2010), se definen sus características.

Se recomienda emplear términos descriptivos para los planos de separación entre estructuras planares, incluyendo la estratificación y la laminación en rocas sedimentarias, la exfoliación en rocas metamórficas y el bandeamiento de flujo en rocas ígneas. De acuerdo con lo anterior, para describir el espesor de los estratos se pueden utilizar los términos que se presentan en la Tabla 7.

» **Tabla 6.** Clasificación de las rocas en general según su textura/estructura

TEXTURA FÁBRICA	TIPO GENÉTICO	CARACTERÍSTICAS
Cristalina Masiva	Ígneas plutónicas y volcánicas de cualquier litología y composición, como granito, basalto, diabasa, etc. Sedimentarias químicas como la caliza o el chert	Metamórficas masivas, como cuarcita, mármol o neis con poca mica Las rocas de este grupo son las más resistentes y menos deformables, independientemente de su origen y estas propiedades no están afectadas por direccionalidad
Cristalina Foliada		Metamórficas foliadas, como pizarra, esquisto, filita y neis con bastante mica Estas rocas son resistentes, algo menos que las anteriores, y sus propiedades están direccionadas por los planos de esquistosidad y foliación
Clástica Consolidada	Clásticas de granulometría fina, que abarca las lutitas	Estas rocas presentan un comportamiento variable esfuerzo-deformación, y poseen direccionalidad de sus propiedades mecánicas. Las más resistentes son las variedades shale y argilita. De estas, las cementadas con sílice y carbonato de calcio son las más durables.
Clástica Cementada	Clásticas de granulometría gruesa, que abarca las areniscas y los conglomerados	
Rocas de falla o Brecha de falla	Cualquier litología afectada por fallamiento intenso	Presencia de brecha (fragmentos visibles > 30% de masa de roca); gouche (fragmentos visibles < 30% de masa de roca) y brechas trituradas (con fragmentos de roca entre > 0,5 cm y < 0,1 cm)

Fuente: tomado y adaptado de INGEOMINAS (2004).

» **Tabla 7.** Los términos para la descripción del laminado y espesor de las capas en rocas sedimentarias y depósitos volcánicoclásticos

TÉRMINO	ESPESOR EN (cm)
Lámina muy delgada	< 0,1
Lámina delgada	0,1 – 0,3
Lámina media	0,3 – 0,6
Lámina gruesa	0,6 – 1,0
Capa muy delgada	1,0 – 3,0
Capa delgada	3,0 – 10
Capa media	10 – 30
Capa gruesa	30 – 100
Capa muy gruesa	> 100

Fuente: tomado de Coe et al., (2010)



## 1.2 Clasificación del macizo rocoso

Existen diferentes métodos de clasificación de la calidad de los macizos rocosos en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades. Teniendo en cuenta la escala de trabajo para el análisis de susceptibilidad de los macizos rocosos a la ocurrencia de movimientos en masa, se propone como mínimo la clasificación de macizos rocosos mediante el Índice Geológico de Resistencia (GSI, por sus siglas en inglés) planteado por Hoek (1994) y Hoek et al. (1995), con las extensiones y variaciones de Marinós & Hoek (2000), Marinós et al. (2005) y Marinós et al. (2007). Es importante aclarar que el uso de este índice no restringe la posibilidad de utilizar otro sistema de clasificación geomecánica más riguroso de acuerdo con las particularidades de las zonas de estudio y la disponibilidad de información.

### 1.2.1 Índice Geológico de Resistencia (GSI)

La caracterización del macizo rocoso con el GSI es simple y está basada en la impresión visual de

la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las diaclasas.

El GSI propuesto por Hoek (1994) y Hoek et al. (1995) proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presenta un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas. Esta clasificación se basa en la observación detallada del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. La determinación del GSI se hace a partir de la Figura 1.

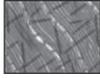
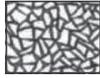
En la Figura 1 se presenta el factor GSI para clasificar macizos rocosos homogéneos y en la Figura 2, para macizos rocosos heterogéneos con intercalaciones tipo *Flysch*, en las que se ingresa desde 2 puntos diferentes, uno horizontal: referente al tamaño y entramamiento de bloques, composición y estructura; el ingreso vertical es referente a las condiciones de las discontinuidades, se converge posteriormente en el valor del GSI dispuesto en las líneas diagonales. En la Tabla 8 se presentan los rangos de calificación del macizo rocoso según el GSI.



**ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA MACIZOS HETEROGÉNEOS COMO LOS FLYSCH (V. Marinós, 2007)**

Se consideran como macizos heterogéneos aquellos que presentan alternancia de capas de tipos litológicos claramente diferenciables con propiedades de resistencia significativamente diferentes. Para los macizos rocosos heterogéneos (tipo Flysch), la alternancia se da entre areniscas y limolitas, aunque puede haber presencia de lutitas. A partir de una descripción de la litología, la estructura y las condiciones superficiales de las discontinuidades (particularmente de los planos de estratificación), se debe seleccionar un cuadro en la tabla. La selección de la estructura debería estar basada en la perturbación tectónica (no perturbado, ligeramente perturbado, fuertemente perturbado – plegado, desintegrado, cizallado), en la proporción de limolitas con respecto a las areniscas y la presencia (o ausencia) de estratificación en el interior de las capas de limolita. En los tipos IV y V cuando el espesor de las capas de arenisca supera los 50 cm, se recomienda un incremento de 5 en el valor de GSI. A partir del tipo IV y los siguientes tipos, los planos de estratificación son perceptibles dentro de las limolitas. Luego se debe localizar la posición en el cuadro que corresponde a las condiciones y se estima el valor promedio de GSI de los contornos. La determinación de la estructura y la condición de las discontinuidades puede variar entre dos campos adyacentes. Nótese que el criterio Hoek-Brown no aplica para fracturas controladas estructuralmente. Donde existen discontinuidades planares, débiles y orientadas desfavorablemente, estas controlarán el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia de algunos macizos rocosos se reduce por la presencia de agua subterránea y por lo tanto puede permitirse un ligero desplazamiento a la derecha en las columnas de condiciones regulares, pobres; y muy pobres. La presión del agua no cambia el valor de GSI y puede tratarse con análisis de esfuerzos efectivos.

Muy buena: Superficies frescas, intactas, muy rugosas.  
Buena: Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas u oxidadas.  
Regular: Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas.  
Pobre: Superficies muy lisas, ocasionalmente cizalladas con revestimientos compactos o rellenos de fragmentos angulares.  
Muy pobre: Superficies muy lisas, cizalladas o altamente meteorizadas con revestimientos o rellenos de arcilla suave.

ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE									
		80	70	60	50	40					
<p><b>Tipo I:</b> No perturbada, con capas de arenisca de espesores de anchas a medias con lentes finos esporádicos de limolitas. En túneles superficiales o taludes donde el confinamiento es pobre, el modo de fractura tiene características controladas por los planos de estratificación y el GSI pierde significación.</p> 	<p><b>Tipo II:</b> Limolitas masivas no perturbadas (los planos de estratificación no son perceptibles) con esporádicas capas finas de arenisca.</p> 	<p><b>Tipo III:</b> Areniscas moderadamente perturbadas con delgados estratos de limolitas.</p> 	<p><b>Tipo IV:</b> Macizos rocosos moderadamente perturbados con arenisca y limolitas en similares cantidades.</p> 	<p><b>Tipo V:</b> Limolitas moderadamente perturbadas con intercalaciones de areniscas.</p> 	<p><b>Tipo VI:</b> Limolitas moderadamente perturbadas con espaciadas intercalaciones de areniscas.</p> 	<p><b>Tipo VII:</b> Macizos rocosos muy perturbados y plegados que conservan su estructura con arenisca y limolitas en similar extensión.</p> 	<p><b>Tipo VIII:</b> Macizos rocosos muy perturbados y plegados de intercalaciones de limolitas y areniscas. La estructura se conserva y la deformación-cizalla no es muy fuerte.</p> 	<p><b>Tipo IX:</b> Macizo rocoso desintegrado que puede ser encontrado en zonas falladas y/o de alta meteorización. Se encuentran principalmente materiales deleznablebles con algunas limolitas deformadas entre las piezas de roca.</p> 	<p><b>Tipo X:</b> Limolitas o lutitas tectónicamente deformadas con intenso plegamiento y fallamiento con capas de arenisca deformadas, llegando a formar una estructura caótica.</p> 	<p><b>Tipo XI:</b> Limolitas o lutitas fuertemente cizalladas tectónicamente formando una estructura caótica con paquetes de arcilla. Las delgadas capas de arenisca son transformadas a pequeñas piezas de roca. Al extremo, el comportamiento es como un suelo.</p> 	
	<p><b>Condiciones superficiales de las discontinuidades (predominantemente los planos de estratificación)</b></p>										I
		80	70	60	50	40	30	20	10		
		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		

Deformación después de la perturbación tectónica

**Figura 2.** Esquema general para estimar el valor del GSI, para macizos rocosos heterogéneos como Flysch

Fuente: tomado de Marinós et al. (2007).

Marinos et al. (2005) realizaron una adaptación del GSI original (Figura 3) para aplicarlo a macizos rocosos litológicamente variados pero no perturbados tectónicamente, como molasas; las molasas consisten en una serie de sedimentos no perturbados tectónicamente de arenisca, conglomerados, limolitas y margas producidos por la erosión de las montañas luego de una fase final de orogenia. Las molasas se comportan de manera muy diferente a los flysch, los cuales tienen la misma composición pero han sido disturbados tectónicamente durante la orogenia. Las molasas se comportan como un macizo rocoso continuo cuando han sido confinadas en profundidad y los planos de estratificación no aparecen tan definidos como superficies de dis-

continuidad. Cerca de la superficie, las capas de la formación son perceptibles y solo así pueden existir similitudes con la estructura de algunos tipos de flysch.

Marinos et al. (2006) recientemente ha presentado una descripción cuantitativa, usando el GSI, para los macizos rocosos dentro de un complejo ofiolítico. Se han incluido muchos tipos que varían debido a su rango de tipos petrográficos, su deformación tectónica y su alteración (Figura 4). La estructura de varios tipos de macizos rocosos, incluyendo tipos masivamente fuertes a débiles y cizallados, tienen condiciones de sus discontinuidades, en la mayoría de los casos, de regulares a muy pobres debido a que han sido afectados por serpentización y cizallamiento.



ESTRUCTURA		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →			
		CONDICIONES DE SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES			
<p><b>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA MOLASAS CONFINADAS</b> (aplicado principalmente en la tunelería) (Hoek, E. Marinos P. y Marinos. V. 2004)</p> <p>A partir de la litología, la estructura y las condiciones superficiales de las discontinuidades, se debe estimar el valor promedio de GSI. No intentar ser tan preciso. Considerar un rango de 33 a 37 es más realista que indicar un GSI=35. Nótese que la tabla no aplica para fracturas controladas estructuralmente. Donde existen planos estructurales débiles con una orientación desfavorable con respecto a la superficie de la excavación, estos controlarán el comportamiento de todo el macizo rocoso. La resistencia al corte de superficies en rocas que están propensas a deteriorarse como resultados de cambios de humedad, se reducirá si hay agua presente. Cuando se trabaja con rocas en las categorías regular a muy pobre, puede hacerse un movimiento hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión del agua es considerada mediante análisis de esfuerzos efectivos.</p>		<p><b>Muy buena:</b> Superficies muy rugosas inalteradas y frescas.</p> <p><b>Buena:</b> Superficies rugosas, ligeramente intemperizadas, con pátinas de óxido de hierro.</p> <p><b>Regular:</b> Superficies lisas, moderadamente intemperizadas y/o alteradas.</p> <p><b>Pobre:</b> Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos compactos o fragmentos angulares.</p> <p><b>Muy pobre:</b> Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos arcillosos blandos.</p>			
<p><b>Intacta o masiva:</b> Muestra de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas. Espaciado 100 cm.</p>		90	M1	N/A	N/A
<p><b>Blocosa:</b> Macizo rocoso inalterado bien entrabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades. Esp. 30 cm.</p>		80	M1		
<p><b>Muy blocosa:</b> Macizo rocoso entrabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades. Esp. 10 cm.</p>		70	M1		
<p><b>Blocosa / Perturbada / Deformada:</b> Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación o esquistosidad. Esp. 3 cm.</p>		60	M1		
<p><b>Desintegrada:</b> Pobremente entrabado, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados. Esp. 1 cm.</p>		50	M1		
<p><b>Laminada / Cizallada:</b> Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistosidad o planos de cizalla.</p>		40	M1		
		30	M1		
		20	M2		
		10			10
		N/A	N/A		

**Notas/** Cuando no hay discontinuidades, usar los resultados de laboratorio directamente.

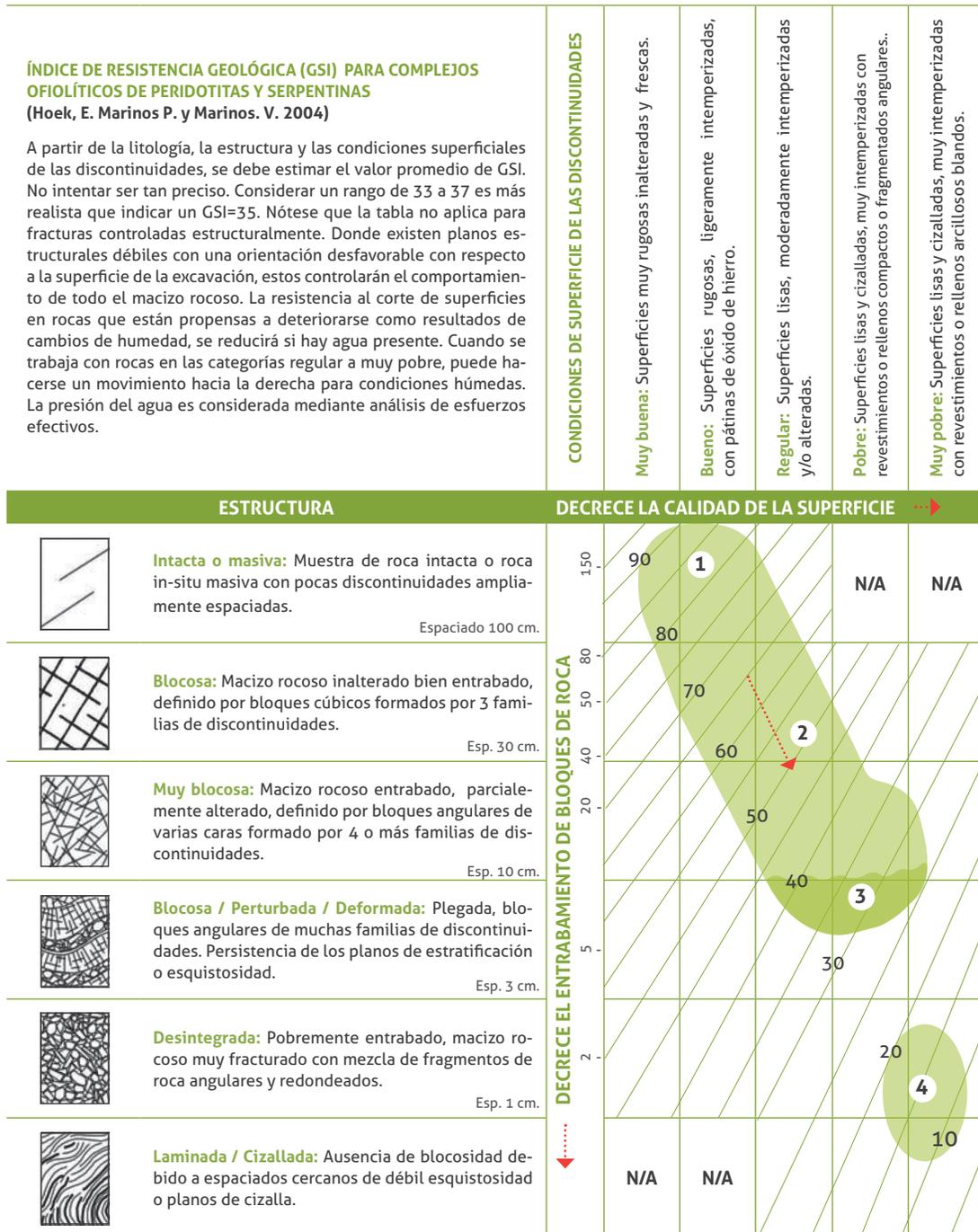
**M1:** Molasas confinadas, ambas homogéneas o intercalaciones de areniscas y limolitas alteradas.

**M2:** Molasas muy fracturadas o brechadas en zonas de falla.

La tabla GSI no debería ser utilizada en conglomerados sueltos los cuales deben tratarse como gravas de río debilmente cementadas.

» **Figura 3.** Tabla GSI para molasas confinadas aplicado principalmente en tunelería

Fuente: tomado de Marinos et al. (2007).



1. Peridotitas masivas duras con discontinuidades muy separadas. Las condiciones de las discontinuidades son malas y solo afectadas por la serpentinización.
2. Peridotitas de calidad buena o regular con discontinuidades que pueden ser afectadas severamente con alteración.
3. Serpentinatas esquistosas. La esquistosidad puede ser más o menos pronunciada y sus planos pueden estar alterados.
4. Serpentinatas cizalladas de calidad mala a muy mala. Los fragmentos también consisten de materiales débiles.

→ Incremento de la presencia de serpentinatas o de otros materiales débiles (como talco) en las juntas o también mayor presencia de esquistosidad.

**Advertencia:** Las áreas sombreadas indican los rangos de GSI más probable de ocurrir en estos tipos de rocas. Estos no pueden ser apropiados para un sitio particular o algún caso específico.

» **Figura 4.** Rangos de GSI para complejos ofiolíticos de peridotitas y serpentinas

Fuente: tomado Marinos et al. (2007).

### 1.3 Perfil de meteorización

Como resultado de la descomposición de las rocas se forma una secuencia de horizontes cada uno de los cuales posee características físicas, químicas y mecánicas diferentes. El paso de un horizonte a otro es gradual y el comportamiento es característico para cada horizonte, dependiendo no solo del patrón estructural impuesto por las proporciones de roca sana, saprolito y suelo

residual; sino también de la mineralogía desarrollada en cada horizonte. El perfil de meteorización en la masa de suelo debe describirse igual que los macizos rocosos. Para ello se adapta la tabla dada a fin de hacerla aplicable a los suelos.

En la Tabla 9 se presenta una correlación de los perfiles de meteorización generalizados para un macizo rocoso propuestos por Deere & Patton (1971), Dearman (1974, 1991) y Forero et al. (1999).

» **Tabla 9.** Comparación de Perfiles de Meteorización de un macizo rocoso según Deere y Patton (1971), Dearman (1974, 1991) y Forero et al. (1999)

	DEERE Y PATTON (1971) (TODAS LAS ROCAS) ZONA	DEARMAN (1974-1991) (TODAS LAS ROCAS)		FORERO ET AL, (1999) (TODAS LAS ROCAS)	DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CAMPO
		ZONA	GRADO UNIDAD		
I -SUELO RESIDUAL	IA. HORIZONTE A (Capa vegetal)	SUELO RESIDUAL (Sr)	VI	SUELO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las capas superiores, ricas en materia orgánica, contienen humus y restos de raíces de plantas; generalmente de color gris oscuro.</li> <li>Todo el material rocoso es convertido a suelo.</li> <li>La macro fábrica y la estructura original es destruida. Característicamente arcillo-limoso. Suelo sin estructuras heredadas.</li> </ul>
	IB. HORIZONTE B				
	IC. HORIZONTE C (SAPROFITO) (Roca descompuesta)	ROCA COMPLETAMENTE METEORIZADA (Rpm)	V	SAPROLITO FINO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Roca decolorada pasando generalmente a colores variados.</li> <li>Macizo rocoso completamente descompuesto y/o desintegrado a suelo, pero aun conservando algo de la macro fábrica original.</li> <li>Las estructuras heredadas (planos de estratificación, foliación, diaclasas y fallas) se conservan.</li> <li>Presencia de fragmentos rocosos entre 10 y 35%, fácilmente excavable y desmenuzable, aun sin ayuda del martillo. Ocasionalmente pueden recobrase núcleos. Suelos con estructuras heredadas.</li> </ul>
II -ROCA METEORIZADA	IA TRANSICIÓN DESDE SAPROLITO HASTA ROCA METEORIZADA	ROCA ALTAMENTE METEORIZADA (Ram)	IV	SAPROLITO GRUESO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Roca decolorada y altamente alterada, en la cual más del 50% del material rocoso está descompuesto o desintegrado a suelo.</li> <li>Fragmentos rocosos rompibles y desmenuzables sin ayuda del martillo.</li> <li>Las estructuras heredadas (planos de estratificación, foliación, diaclasas y fallas) se mantienen, en general se presentan oxidadas, abiertas, con o sin relleno. Saprolito con fragmentos pequeños de roca.</li> <li>Las estructuras heredadas (planos de estratificación, foliación, diaclasas y fallas) se conservan.</li> <li>Las estructuras heredadas (planos de estratificación, foliación, diaclasas y fallas) se conservan.</li> <li>La meteorización esferoidal es común.</li> <li>Presencia de fragmentos de roca sin meteorizar entre 35 y 70%.</li> </ul>
	IIB ROCA PARCIALMENTE METEORIZADA	ROCA MODERADAMENTE METEORIZADA (Rmm)	III	ROCA Y SUELO - MATERIAL INTERMEDIO	
III -ROCA NO METEORIZADA	III ROCA FRESCA	ROCA DÉBILMENTE METEORIZADA (Rdm)	II	MACIZO ROCOSO METEORIZADO >50% Roca	<ul style="list-style-type: none"> <li>La roca se presenta altamente decolorada con notable meteorización, en la cual menos del 50% del material rocoso está descompuesto o desintegrado a suelo.</li> <li>Material rocoso rompible y excavable con ayuda del martillo y otras herramientas.</li> <li>Las discontinuidades pueden estar oxidadas y abiertas, con o sin relleno. Bloques de roca sin entramamiento.</li> </ul>
		ROCA NO METEORIZADA (FRESCA) (Rf)	I	MACIZO ROCOSO NO METEORIZADO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Macizo rocoso débilmente decolorado.</li> <li>La roca puede estar decolorada en las superficies de las discontinuidades, las cuales pueden estar abiertas y oxidadas; la roca es dura resistente, excavable con ayuda de otras herramientas. Bloques de roca sin entramamiento.</li> </ul>
					<ul style="list-style-type: none"> <li>Roca fresca sin signos visibles de meteorización.</li> <li>Las discontinuidades mayores pueden presentar ocasionalmente decoloración y oxidación. +C1:19</li> </ul>

Fuente: autores.

Para la descripción de los suelos residuales se recomienda considerar los niveles IV, V y VI (saprolito y suelo residual) del perfil de meteorización de Dearman (1974), ya que los otros niveles (I a III) corresponden a la roca en diferentes grados de alteración (moderada a débilmente

meteorizada) y la roca fresca. En la zona de saprolito aunque se conserva la estructura original de la roca parental, el material tiene las características de un suelo y por sus propiedades no se comporta como una roca (Tabla 10).

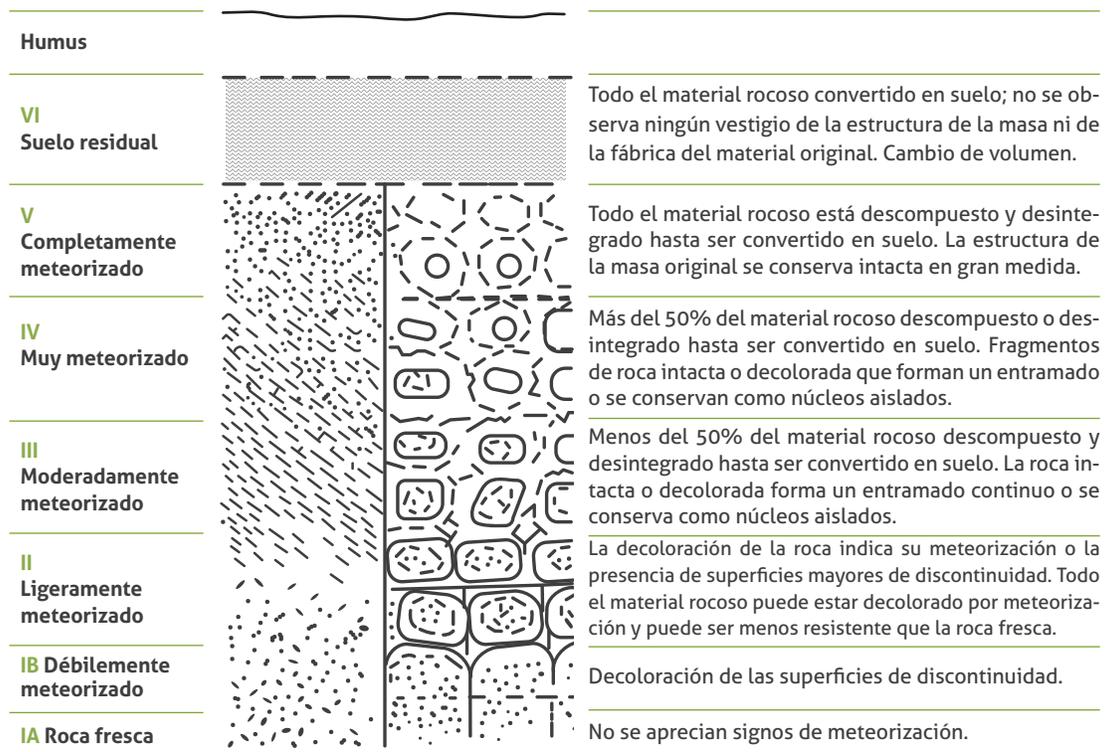
» **Tabla 10.** Descripción y comportamiento del perfil de meteorización

HORIZONTES	RECONOCIMIENTO DE CAMPO	COMPORTEAMIENTO GENERAL
<b>VI SUELO RESIDUAL</b>	No se reconoce fábrica relicta o heredada; a lo sumo algo de fábrica mineral. Retorno de agua turbia en la perforación, sin pérdida	Incompetente como material de fundación e inestable en excavaciones, si no hacen obras de protección y mitigación
<b>V ROCA COMPLETAMENTE DESCOMPUESTA (saprolito fino)</b>	Roca decolorada muy deleznable con fábrica relicta. Retorno de agua turbia en la perforación, con algo de pérdida. <i>Sin recobro</i>	Puede excavar a mano; incompetente como fundación de grandes estructuras; en cortes de talud se requiere protección vegetal
<b>IV ROCA ALTAMENTE DESCOMPUESTA (saprolito grueso)</b>	Roca decolorada; los fragmentos se pueden desmenuzar aún con la mano. Pueden recobrase algunos núcleos de perforación. Pérdidas de agua de lavado. <i>Recobro de núcleos &lt; 30% - 40%</i>	Las fallas de los taludes son controladas por la fábrica relicta o heredada
<b>III ROCA MODERADAMENTE DESCOMPUESTA</b>	Roca decolorada; los fragmentos no pueden romperse con la mano y presentan meteorización química. Se pierde casi toda el agua de lavado si no se usa lodo. <i>Recobro de núcleos &gt; (30% - 40%)</i>	Requiere el uso de explosivos para excavar; sirve como fundación de estructuras pequeñas y puede usarse para relleno semipermeable; su estabilidad en cortes depende de su actitud estructural
<b>II ROCA DÉBILMENTE DESCOMPUESTA (roca)</b>	Roca algo decolorada, presenta apariencia de roca fresca, salvo que posee meteorización superficial en las diaclasas y fracturas. Sin meteorización química pero con bastante oxidación superficial	Requiere el uso de explosivos para excavar; estable como fundación de grandes estructuras; las diaclasas abiertas y la posibilidad de que circule agua a presión por estas es desfavorable para la estabilidad de excavaciones
<b>I ROCA FRESCA (roca)</b>	Roca parental sana, sin oxidación superficial o muy poca	Estable como fundación; las fallas de taludes de corte están controladas estructuralmente

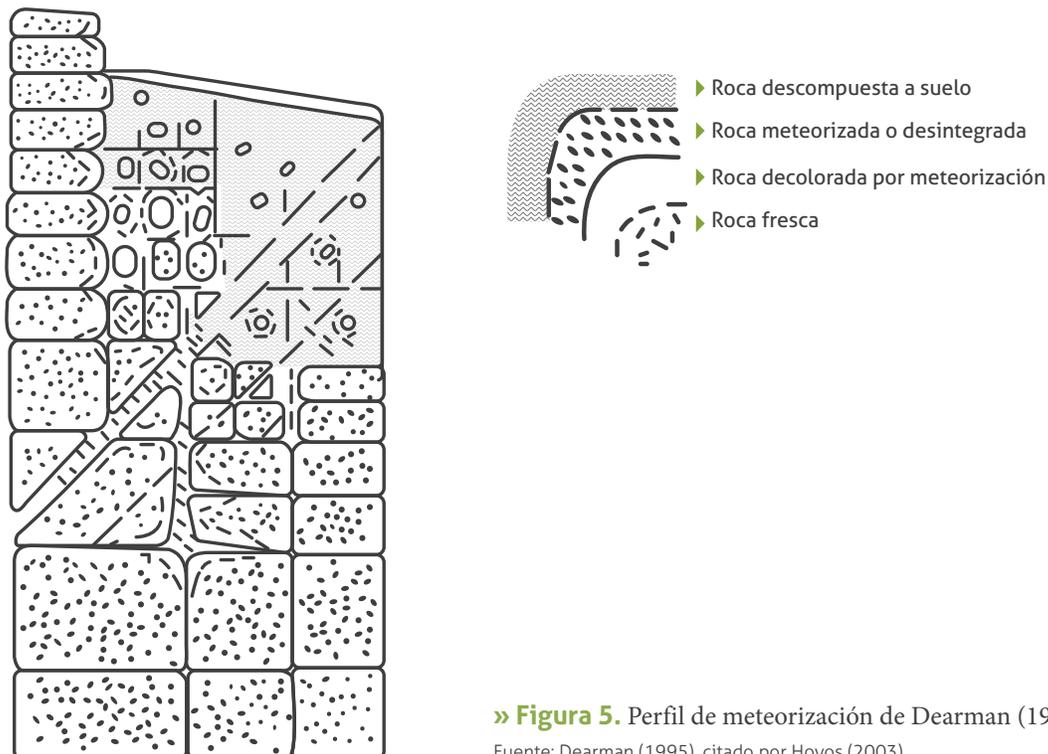
Para la descripción de los suelos tener en cuenta los horizontes IV, V y VI.

Fuente: tomado y traducido de Dearman (1974).

**A.** Perfiles idealizados de meteorización sin núcleos (izquierda) y con núcleos (derecha)



**B.** Ejemplo de un perfil complejo con núcleos de roca



» **Figura 5.** Perfil de meteorización de Dearman (1995)

Fuente: Dearman (1995), citado por Hoyos (2003).

## 1.4

### Descripción de las unidades de roca

Para las unidades de roca se recomienda realizar la descripción en el siguiente orden:

1. Clasificación geomecánica: de acuerdo con el sistema utilizado. En función del GSI se tienen tres clases principales de unidades de roca; Roca Dura (macizos de calidad buena y muy buena o tipo I, II y III), Roca Intermedia (macizos de calidad regular o tipo IV y V) y Roca Blanda (macizos de calidad mala y muy mala o tipos VI, VII, VIII y IX).
2. Litología: composición y estructura de la roca. Por ejemplo, arenisca, granito, basalto, gneis, arcillolita, esquistos, etc.
3. Génesis: corresponde con la nomenclatura estratigráfica, es decir, el grupo, formación o miembro que identifica a la unidad de roca.
4. Propiedades ingenieriles: se refiere a características de la matriz rocosa tales como tamaño y forma de los granos, color, grado de meteorización y alteración, resistencia a la compresión simple.
5. Grado de meteorización: estado de la unidad de acuerdo con los horizontes I, II o III del perfil de meteorización de Dearman (1974).
6. Rasgos estructurales: pliegues y familias de discontinuidades (diaclasas, planos de falla, foliación, etc.), orientación de las discontinuidades y estado de las discontinuidades.

## 2.

### CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIDADES DE SUELO

De acuerdo con Selby (1993), el suelo es un depósito suelto o blando de origen natural formado en la superficie de la Tierra, el cual se debilita o ablanda por inmersión en agua; puede ser el resultado de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan para producir un material rico en materia orgánica con horizontes característicos (capas) a poca profundidad. El suelo puede formarse a partir de la erosión o meteorización de rocas más duras o de suelos más antiguos “in situ” o puede ser material transportado o depositado como una formación geológica débil. Cual-

quiera que sea su origen, se puede definir como un material particulado, cuyas propiedades están controladas por el tamaño de las partículas que lo conforman, forma, gradación, contactos, enlaces químicos entre partículas y agregados. Otros factores que controlan las propiedades de los suelos son los espacios vacíos y el fluido en los poros. Esta definición de suelo incluye los depósitos sedimentarios jóvenes inconsolidados tales como loess, aluviones, depósitos glaciales y piroclásticos no soldados, así como regolitos y suelos pedogenéticos. Se consideran como materiales fácilmente excavables aun por métodos manuales. Teniendo en cuenta su origen, los suelos se pueden clasificar como suelos residuales (horizontes IV, V, VI del perfil de meteorización de Dearman, 1974), depósitos volcánico-clásticos, suelos transportados y suelos antrópicos.

Para fines prácticos de caracterización de las unidades de suelo, esta guía considera conveniente agrupar los tipos de suelos de acuerdo con el tamaño de grano, tal como lo plantean New Zealand Geotechnical Society (NZGS) (2005) basados en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, por sus siglas en inglés), en el cual se proponen dos grandes grupos de suelos a partir del tamaño de grano: suelos gruesos (*coarse soils*) y suelos finos (*fine soils*). Conforme a ASTM D 2487 - 06 se considera que un suelo es grueso si más del 50% de los granos superan los 0,075 mm de tamaño (gravas y arenas) y un suelo es fino si más del 50% de los granos son inferiores a 0,075 mm de tamaño (limos y arcillas). De acuerdo con NZGS (2005), existen dos características que pueden presentar en mayor o menor medida los suelos finos, pero que no la presentan los suelos gruesos, las cuales se conocen como *cohesión* y *plasticidad*. La cohesión se refiere al hecho de que las partículas del material se mantienen adheridas unas con otras (pegadas), mientras que la plasticidad es la propiedad que le permite a un material ser deformado sin experimentar cambio de volumen o rebote, y sin agrietarse o desmoronarse. En general podría considerarse que los suelos finos tienden a ser cohesivos y plásticos, mientras que los suelos gruesos no lo son.

Teniendo en cuenta lo presentado por NZGS (2005) y adaptando lo planteado por Dearman

(1991), existen características generales que son comunes para cualquier tipo de suelo, entre las que se encuentran: génesis (origen), composición de las partículas, color, condición de humedad y estructuras relictas y/o discontinuidades en la masa de suelo. Sin embargo, existen también características propias para los suelos finos tales como la consistencia y la plasticidad, así como características que identifican en particular a los suelos gruesos: forma (redondez y esfericidad) y tamaño, gradación, selección, estructura y empaquetamiento, compacidad y densidad relativa.

Para la descripción y caracterización de los suelos se recomienda utilizar el Formato 2 (pp. 1 y 2), adjunto al final de este documento, los cuales permiten de manera sistemática recopilar la información y llevar un registro que puede ser introducido en una base de datos. La caracterización de los suelos debe partir de la identificación y descripción ascendente (base a techo) de los diferentes niveles o secuencia de materiales que conforman el suelo, con la descripción de las

características de cada horizonte o capa encontrada en el perfil, ya sea a partir de afloramientos, apiques, trincheras o sondeos.

Se recomienda que la descripción de las unidades de suelo (residuales, transportados, volcánicos o antrópicos) se realice incluyendo tanto las características generales para cualquier tipo de suelo (ya mencionadas), como aquellas que son específicas para los suelos gruesos y para los finos (según sea el caso).

A continuación, se describen las características mencionadas que deben incluirse en la descripción de una unidad de suelo.

## 2.1 Características generales

### 2.1.1 Génesis

Esta característica hace referencia al origen del suelo y para su clasificación se puede tomar como referencia la Tabla 11, que muestra los nombres de los diferentes tipos de suelos. Aplica tanto para suelos cohesivos como no cohesivos.

» **Tabla 11.** Clasificación genética de las unidades de suelo

TIPO DE MATERIAL	ORIGEN DE LA UGS	TIPO DE UGS
Roca	Roca inalterada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Roca dura (Calidad de macizo buena y muy buena)</li> <li>Roca intermedia (Calidad de macizo regular)</li> <li>Roca blanda (Calidad de macizo mala y muy mala)</li> </ul>
	Derivadas de roca In situ	Suelo residual: Horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI.
	Depósitos volcánico-lásticos primarios	Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caídas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza).
	Depósitos volcánico-lásticos secundarios	Lahar, avalancha de escombros
Suelo	Depósitos aluviales	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aluviones recientes y de cauce activo</li> <li>Llanura aluvial</li> <li>Abanicos o conos aluviales</li> <li>Terrazas aluviales</li> <li>Depósitos fluvio-torrenciales</li> </ul>
	Depósitos lacustres y paludales	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suelos fluvio-lacustre</li> <li>Suelos paludales</li> </ul>
	Depósitos costeros	Deltas, Barras, Playas, etc.
	Depósitos eólicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dunas y Médanos</li> <li>Loess</li> </ul>
	Depósitos glaciares	<ul style="list-style-type: none"> <li>Morrenas y Tillitas</li> <li>Suelos Fluvio-glaciares</li> </ul>
	Depósitos de gravedad y ladera	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coluvial</li> <li>Talus, derrubios de pendiente</li> <li>Flujos (de lodo, tierra y de escombros)</li> </ul>
	Depósitos antrópicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Llenos de basuras</li> <li>Llenos de Escombros</li> <li>Llenos mixtos</li> </ul>

Fuente: modificado de SGC (2013).

### 2.1.2 Composición de las partículas

La composición de los suelos depende de las características de los materiales que los originan (roca o sedimento), las condiciones climáticas y el tiempo de formación. La descripción de la composición mineralógica del suelo incluye tanto las partículas identificables a simple vista y las que se puedan identificar con ayuda de la lupa de mano. En este sentido es importante considerar que las partículas más grandes suelen ser fragmentos de roca y pueden describirse de esta manera, mientras que los granos más finos suelen corresponder a minerales individuales, por ejemplo, mica, cuarzo y feldespatos, entre otros. Sin embargo, pueden estar presentes cristales minerales de gran tamaño, como, por ejemplo, el yeso en arcillas (Dearman, 1991).

### 2.1.3 Color

Para la descripción del color de las unidades de suelo se recomienda utilizar la carta de colores de suelos de Munsell (Munsell® Soil Color Book).

### 2.1.4 Condición de humedad

En campo se puede medir de manera cualitativa mediante observaciones directas, para lo cual se recomienda el uso de la Tabla 12, donde se presenta la terminología para describir la humedad natural o condición de humedad en el campo de acuerdo con los criterios propuestos por Varnes (1978). En el caso de suelos gruesos que presenten clastos embebidos en matriz más fina, se analiza la condición de humedad para la matriz.

» **Tabla 12.** Terminología para describir la humedad natural o condición de humedad en el campo

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
Seco	No hay humedad visible.
Húmedo	Contiene algo de humedad pero no se observa agua libre; el material se puede comportar plásticamente pero no fluye.
Mojado	Contiene humedad suficiente para comportarse en parte como un líquido pero este no fluye.
Muy mojado	El agua fluye de la pasta de suelo.

Fuente: tomado de Varnes (1978).

### 2.1.5 Estructuras relictas o discontinuidades en la masa de suelo

Las estructuras relictas comprenden la descripción de una serie de discontinuidades, fisuras o grietas, que en muchos casos tienen continuidad desde los horizontes de roca completamente meteorizada hacia los horizontes superiores de cualquier tipo de suelo, pero especialmente a los suelos residuales. Para determinar las estructuras relictas o discontinuidades se sugiere la terminología de la Tabla 13, donde se presentan las descripciones de las estructuras.

» **Tabla 13.** Terminología para la descripción de discontinuidades en masas de suelo

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
Estructuras relictas	Discontinuidades de la roca parental que se conservan en la masa de suelo, tales como diaclasas, bandeamiento, clivaje, estratificación o fallas.
Fisuras	Discontinuidades cerradas generadas en la masa de suelo posteriormente a su formación por esfuerzos de tensión o corte.
Grietas	Discontinuidades abiertas generadas en la masa de suelo posteriormente a su formación por esfuerzos de tensión o corte.

Fuente: INGEOMINAS (2004).

### 2.1.6 Espesor del suelo

Una de las características importantes a levantar en los suelos es su espesor, el cual será expresado en metros y será medido desde la base del horizonte IV (roca altamente descompuesta - saprolito grueso) en el caso que exista, hasta el suelo residual u orgánico dentro del perfil de meteorización de la Figura 5, de acuerdo con Dearman (1995), citado por Hoyos (2003).

## 2.2 Características para suelos gruesos

### 2.2.1 Forma, esfericidad, redondez y tamaño (textura) de las partículas

La forma, esfericidad y redondez de los granos son propiedades que resultan del intemperismo y la erosión que sufren los materiales por procesos de transporte y durante la sedimentación. Estas características del material del suelo, se describen

siguiendo los procedimientos sedimentológicos tradicionales. La redondez de los fragmentos en un depósito se define de acuerdo con la clasificación tradicional sedimentológica propuesta por Wadell (1933) citado por Murcia et al. (2013) que clasifica los fragmentos como muy angulares, angulares, subangulares, sub-redondeados, redondeados y bien redondeados (Figura 6). Estas propiedades tienen mayor aplicación en suelos no

cohesivos, sin embargo, el tamaño de partículas aplica para cualquier tipo de suelo.

El tamaño de las partículas (textura) se puede determinar usando la Tabla 14, mientras que para la forma de las partículas, redondez (el grado de redondeamiento en las esquinas y bordes) y características de la superficie de los granos, se puede usar la Tabla 15 y la Figura 7.

» **Tabla 14.** Texturas de los suelos según el tamaño de las partículas (ASTM D2487-00: *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes - Unified Soil Classification System*)

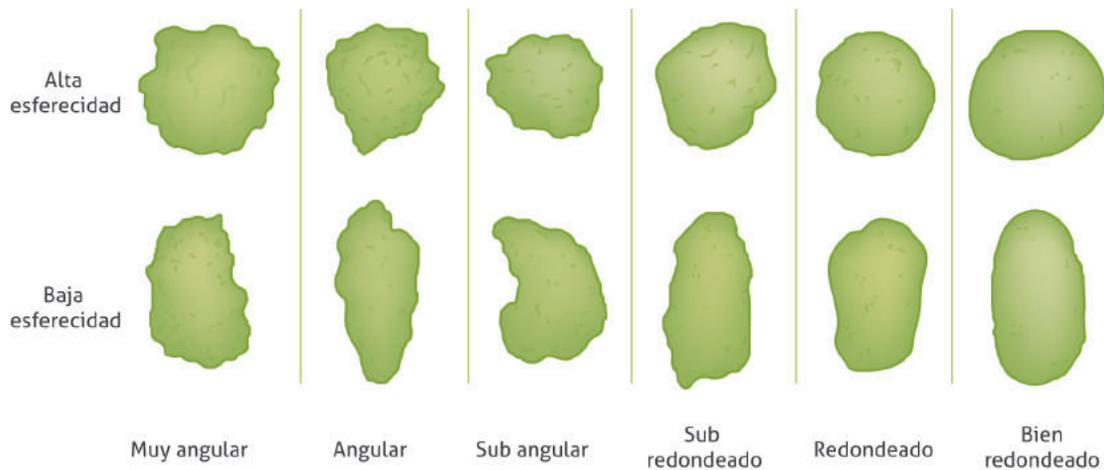
TAMAÑO (mm)	CLASIFICACIÓN	TEXTURA
> 300	Bloques	Bloques y cantos
75 - 300	Cantos	
19 - 75	Gravas gruesas	Gravosa
4,75 - 19	Gravas finas	
2,0 - 4,75	Arenas gruesas	Arenosa
0,425 - 2,0	Arenas medias	
0,075 - 0,425	Arenas finas	
< 0,075	Finos (Limos y arcillas)	Arcillosa, arcillo limosa, limo arcillosa y limosa

Fuente: Tomado de ASTM.

» **Tabla 15.** Resumen de la descripción morfológica (forma, redondez y tipo superficie) de los clastos o granos que conforman un suelo (depósito)

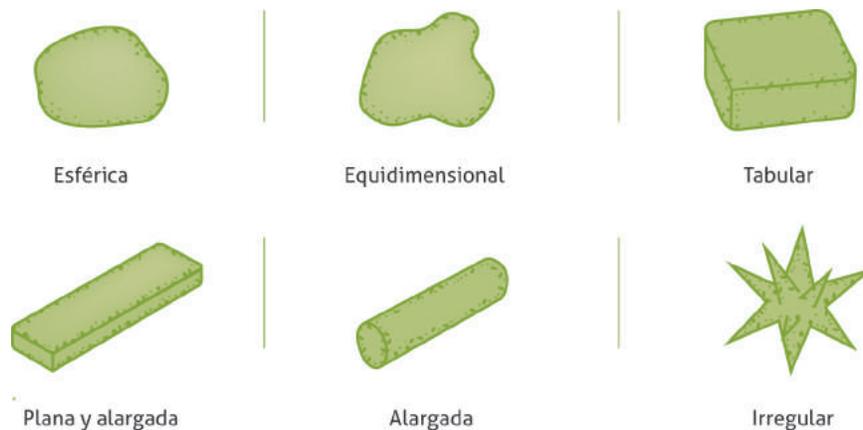
ATRIBUTO	GEOMETRÍA
MORFOLOGÍA DE LOS GRANOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esférica</li> <li>• Equidimensional (igual largo, ancho y alto)</li> <li>• Plana</li> <li>• Alargada</li> <li>• Plana y alargada</li> <li>• Irregular</li> </ul>
REDONDEZ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angular</li> <li>• Subangular</li> <li>• Subredondeada</li> <li>• Redondeada</li> <li>• Bien redondeada</li> </ul>
CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rugosa</li> <li>• Lisa</li> </ul>

Fuente: tomado de Coe et al. (2010).



» **Figura 6.** Carta de comparación visual de la redondez y esfericidad de los clastos o granos

Fuente: tomado de Coe et al. (2010).



» **Figura 7.** Morfología de los granos (partículas)

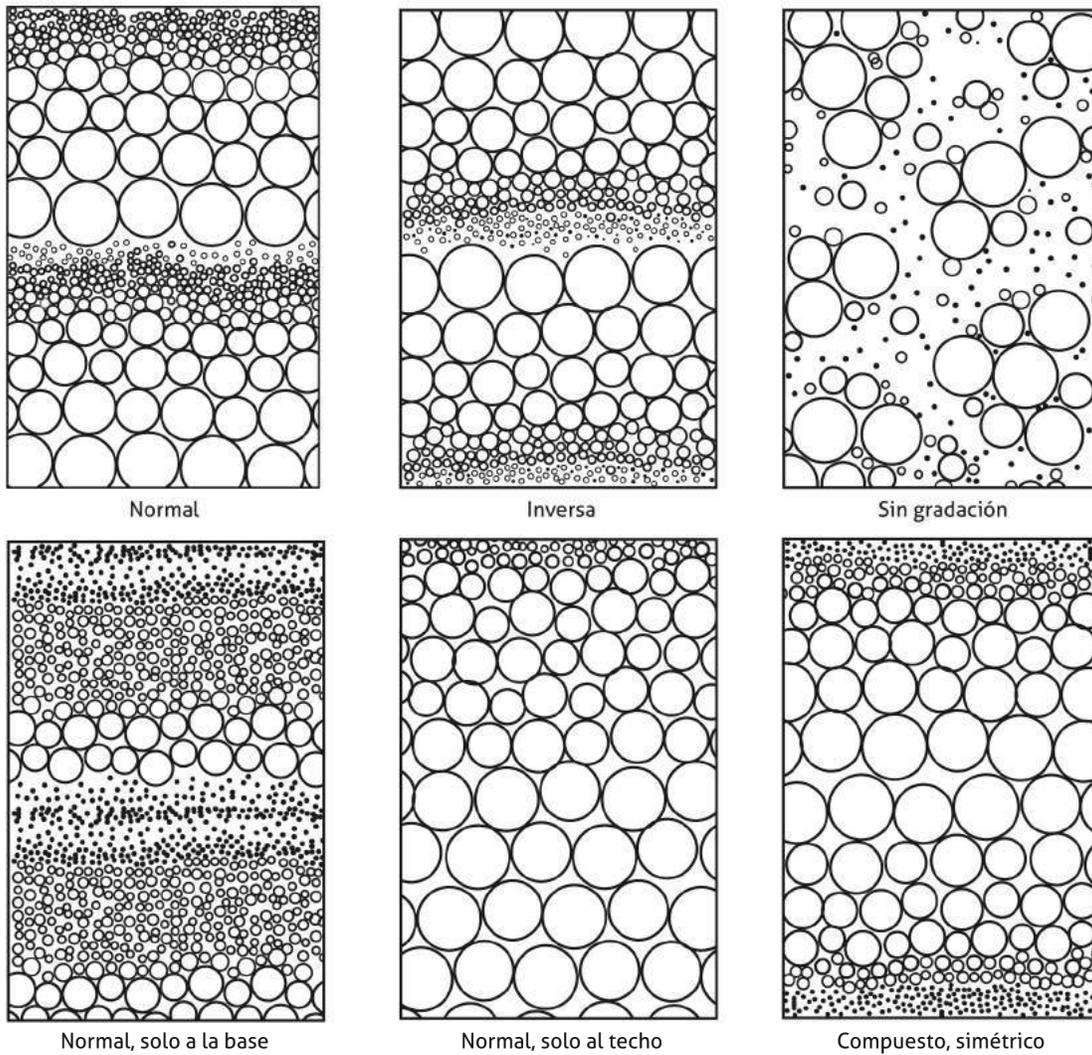
Fuente: tomado de Coe et al. (2010).

### 2.2.2 Gradación

Corresponde al grado de mezcla de los distintos tamaños de las partículas que componen el material (suelo o roca) como resultado de cambios energéticos del medio (Coe et al., 2010). En la Figura 8 se presentan los tipos de gradación. Esta propiedad tiene mayor aplicación en suelos no cohesivos.

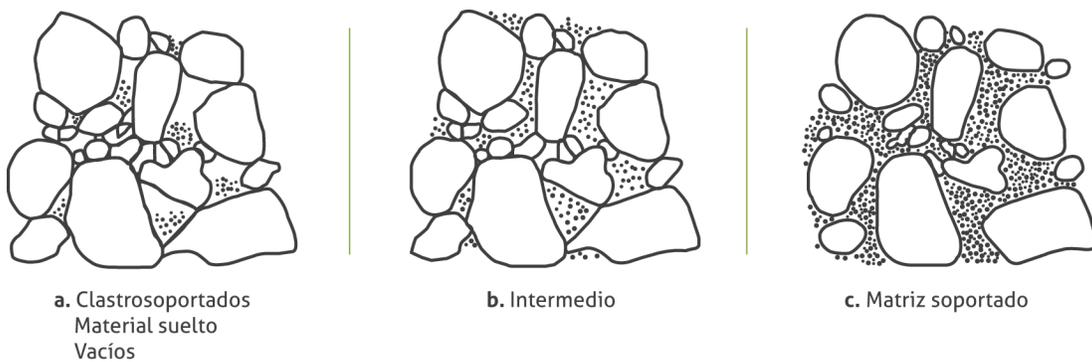
### 2.2.3 Estructura y empaquetamiento

Los suelos (depósitos) presentan cierto grado de empaquetamiento o compactación, en la cual los granos se van acomodando y reduciendo espacios, lo que les permite entrar en contacto, generando, principalmente, empaquetamiento clasto o matriz soportado, como se observa en la Figura 9.



» **Figura 8.** Tipos de gradación

Fuente: tomado y traducido de Coe et al. (2010).



» **Figura 9.** Tipos de empaquetamiento o estructuras de soporte en depósitos

Fuente: (Suárez, 1998).

### 2.2.4 Estado de meteorización

Para describir el estado de meteorización de las partículas en suelos gruesos se puede utilizar la Tabla 4. Los cambios más obvios que permiten identificar que un suelo ha sido meteorizado se pueden apreciar como decoloración o bandeamiento del color, agrietamiento, desintegración y descomposición de minerales individuales y fragmentos de roca.

### 2.2.5 Compacidad

Es un término característico de los suelos granulares (gruesos) y se puede definir como el grado de compactación de los suelos no cohesivos. La compacidad se relaciona estrechamente con la densidad relativa. La evaluación en campo de esta propiedad se hace de acuerdo con la Tabla 16.

» **Tabla 16.** Criterios para describir la compacidad

DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN PRUEBA DE CAMPO
Débil (Suelta)	Se desmorona o rompe con poca presión en los dedos.
Moderada (Media)	Se desmorona o rompe con considerable presión de los dedos.
Fuerte (Densa)	No se desmorona con la presión de los dedos.

Fuente: tomado de U.S. Bureau of Reclamation (2001).

### 2.2.6 Densidad relativa

La densidad relativa es una manera de indicar el grado de compacidad (compactación de un suelo), dada por la relación porcentual entre: a) la diferencia de la relación de vacíos de un suelo no cohesivo en su estado más suelto y cualquier relación de vacíos del suelo compactado, y b) la diferencia entre las relaciones de vacíos en sus estados más suelto y más denso (Normas ASTM D4253 y D4254 citadas por Hoyos, 2001). La densidad relativa es una propiedad índice de los suelos y se emplea normalmente en gravas y arenas, es decir, en suelos que contienen casi exclusivamente partículas mayores a 0,074 mm. La determinación de la densidad relativa se hace con unas sencillas pruebas de campo como se muestra en la Tabla 17.

» **Tabla 17.** Terminología para describir la densidad relativa de los suelos arenosos

TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO
Muy suelta	Puede ser excavado con la mano.
Suelta	Puede ser excavado con pala. Se puede introducir fácilmente una puntilla de 50 mm. Fácilmente triturado entre los dedos.
Densa	Se requiere pica para ser excavado. Una puntilla de 50mm 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.

Fuente: tomado de SGC (2013).

### 2.2.7 Selección

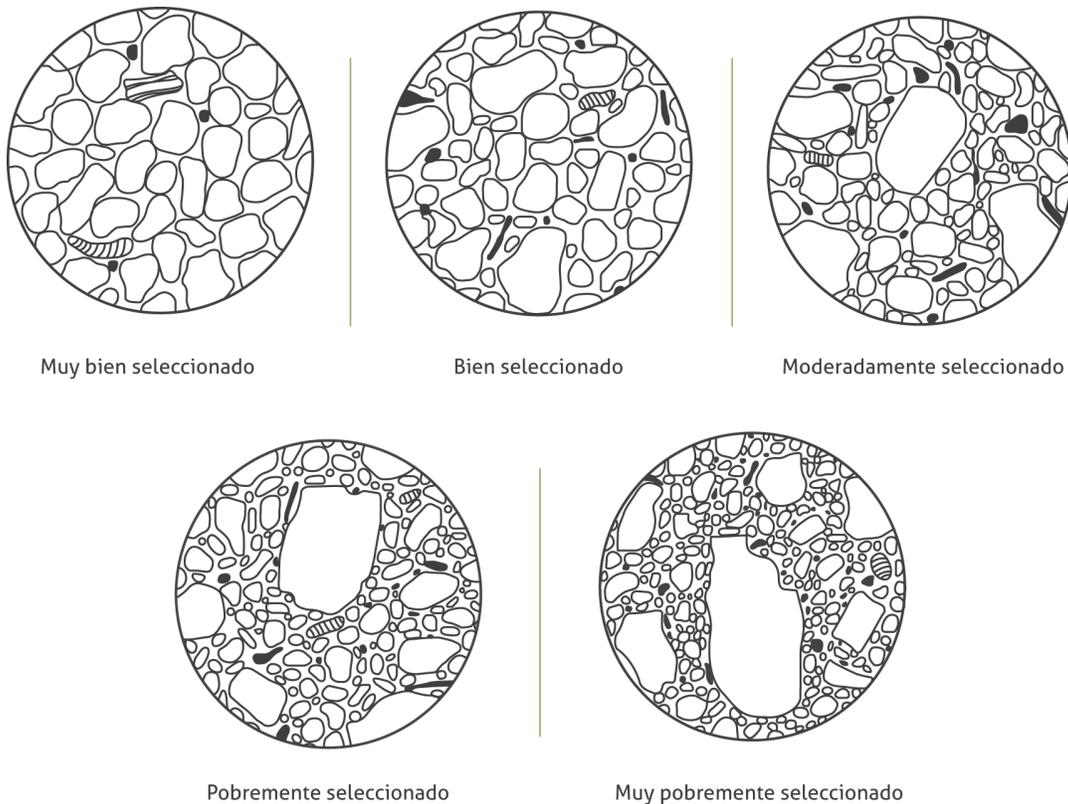
Es el arreglo o agrupamiento de los granos del mismo tamaño, o la variación en el tamaño de los granos. El grado de selección es un reflejo del nivel de energía en el ambiente de depósito y se estima ya sea por el análisis de mallas en sedimentos o por comparación visual en la roca o suelo (Figura 10). En la Tabla 18 se muestra la comparación entre la clasificación de selección sedimentológica tradicional según Folk & Ward (1957), citado por Murcia et al. (2013), y la referente a depósitos volcánoclasticos primarios según Cas & Wright (1987), citado por Murcia et al. (2013).

## 2.3

### Características para suelos finos

#### 2.3.1 Consistencia

La consistencia se define como la firmeza o solidez que presenta la masa de suelo. Es una característica de los suelos finos que se refiere a la resistencia del suelo a ser deformado o amasado y depende del contenido de humedad. Puede relacionarse con la resistencia al corte no drenado, en la medida en que su determinación mediante pruebas de campo puede relacionarse directamente con valores de resistencia del suelo ante la aplicación de esfuerzos de corte. Para su clasificación en campo se utiliza la terminología de la Tabla 19.



» **Figura 10.** Tabla de comparación visual para la clasificación de la selección (sorteamiento) de las partículas

Fuente: tomado de Coe et al. (2010).

» **Tabla 18.** Comparación entre el grado de selección de fragmentos en un depósito, considerando los criterios sedimentológicos tradicionales (Folk & Ward, 1957) con los volcánicos propuestos por Cas & Wright (1987)

SELECCIÓN ( $\phi$ )	FOLK & WARD (1957)	CAS & WRIGHT (1987)
< 0,35	Muy bien seleccionado	
0,35 a 0,49	Bien seleccionado	Muy bien seleccionado
0,50 a 0,99	Moderadamente seleccionado	
1,00 a 1,99	Pobremente seleccionado	Bien seleccionado
2,00 a 3,99	Muy pobremente seleccionado	Pobremente seleccionado
> 4,00	Extremadamente mal seleccionado	Mal seleccionado

Fuente: tomado de Murcia et al. (2013).

### 2.3.2 Plasticidad

Es una de las propiedades importantes de los suelos finos. Se refiere a la capacidad que tiene un suelo para ser moldeado o deformado sobre un amplio rango de contenido de humedad, sin agrietamiento o sin mostrar ninguna tendencia al cambio de volumen (NZGS, 2005).

Para evaluar la plasticidad en el campo es necesario remoldear el suelo sobre un rango de contenido de humedad. El procedimiento consiste en enrollar el suelo en las manos hasta formar un cordón de cerca de 3 mm de diámetro, sin que dichos cilindros se desmoronen.

La resistencia en estado seco del material es también una buena guía para determinar la plasticidad: las arcillas altamente plásticas se volverán ‘rocas duras’ cuando están secas, mientras

que las de baja plasticidad se pueden desmenuzar en los dedos. En la Tabla 20 se definen los criterios para la descripción de la plasticidad.

» **Tabla 19.** Terminología utilizada para describir la consistencia de un suelo arcilloso

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

Fuente: tomado y traducido de Weltman & Head (1983).

» **Tabla 20.** Criterios para describir la plasticidad

CÓDIGO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
NPL	No plástico	No pueden formarse rollos con ningún contenido de humedad
SLP	Ligeramente plástico (baja)	Se forma el cordón pero se rompe inmediatamente si se le curva en forma de aro; la masa de suelo se deforma por una fuerza muy ligera
PL	Plástico (Media)	Se forma el cordón pero se rompe al doblarlo en forma de aro; se requiere una fuerza ligera a moderada para deformar la masa de suelo
Vpl	Muy plástico (Alta)	Se forma el cordón y se puede doblar en forma de aro; se requiere una fuerza moderadamente fuerte a muy fuerte para deformar la masa de suelo

Fuente: ONU (2009).

## 2.4 Descripción de las unidades de suelo

Para las unidades de roca se recomienda realizar la descripción en el siguiente orden:

1. Génesis de la unidad: suelo residual o transportado. Para suelos transportados es necesario especificar el agente de transporte (Tabla 11).
2. Estructura o textura: para suelos transportados se diferencia la estructura de soporte entre matriz – soportado o clasto – soportado. Para suelos residuales se diferencia entre finogranular (o cohesivo) o gruesogranular (o no cohesivo).
3. Litología: composición y origen de las partículas. En suelos residuales puede asociarse con el material parental.
4. Propiedades ingenieriles: color, condición de humedad, estructuras relictas o discontinuidades y espesor.
5. Características físicas y químicas de las partículas: forma gradación, empaquetamiento, compacidad, densidad, consistencia y estado de alteración, entre otras.

» Formato 1. Caracterización de unidades de roca (macizo rocoso)

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO		MAPAS DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES - GEOLOGIA PARA INGENIERIA		CARACTERIZACIÓN DE MACIZO ROCOSO		FORMATO DE CAMPO					
INFORMACIÓN GENERAL				CLASE DE AFLORAMIENTO							
PROYECTO: Departamento: _____ Municipio: _____ Vereda: _____		Nombre: _____ Fecha: _____ N° De Estación: _____		Natural <input type="checkbox"/> Corte superficial <input type="checkbox"/> Excavación subterránea <input type="checkbox"/> Trinchera, Apique <input type="checkbox"/>							
Latitud: _____ Longitud: _____ Altitud: _____		Unidad Geológica Superficial: _____ N° litologías asociadas a la UGS: _____		1 <input type="checkbox"/> Espesor (m) _____ 2 <input type="checkbox"/> Espesor (m) _____							
SECUENCIA ESTRATIGRAFICA				CARACTERIZACIÓN DE LA UGS							
Depósito de Gravedad: _____ Suelo Transportado: _____ Suelo Residual: _____ Roca: _____		Si es suelo residual: Horizonte: _____ III _____ II _____ I _____		GRADO DE METEORIZACIÓN: 1. 2. _____ Ninguna _____ Débil _____ Moderada _____ Alta _____		DUREZA: 1. 2. _____ Muy Dura _____ Dura _____ Moderada _____ Blanda _____ Muy blanda _____					
FÁBRICA: 1. 2. _____ Cristalina Masiva _____ Cristalina foliada _____ Clástica cementada _____ Clástica consolidada _____		PERMEABILIDAD: 1. 2. _____ CUALITAT: 1. 2. _____ Baja _____ Media _____ Alta _____		TAMAÑO DEL GRANO: 1. 2. _____ Grueso _____ Fino _____		COMPOSICIÓN: 1. 2. _____ _____ _____					
LEVANTAMIENTO DE DISCONTINUIDADES											
DISTANCIA ENTRE DIACLASAS	TIPO	DIRECCION BUZAMIENTO	BUZAMIENTO	PERISTENCIA	ANCHO DE ABERTURA	TIPO DE RELLENO	RUGOSIDAD SUPERFICIAL	FORMA DE LA SUPERFICIE	HUMEDAD EN DIACLASAS	ESPACHAMIENTO	OBSERVACIONES
	TIPO: 10. Zona de falla 1. Falla 2. Diaclasa 3. Clivaje 4. Esquistosidad 5. Citalla 6. Fisura 7. Grieta de tensión 8. Foliación 9. Estratificación				ANCHO DE ABERTURA: 1. Muy estrecha (<0,1 mm) 2. Estrecha (0,1 a 0,25 mm) 3. Parcialm abierta (0,25 a 0,5 mm) 4. Abierta (0,5 a 2,5 mm) 5. Moderadami abierta (2,5 a 10,0 mm) 6. Ampla (>10 mm) 7. Muy amplia (1-10 cm)	TIPO DE RELLENO: 1. Limpia 2. Superficie textida 3. No cohesivo 4. Matriz arcillosa inactiva 5. Matriz arcillosa expansiva 6. Cementada 7. Clorita, talco o yeso 8. Otra	RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE: 1. Rugosidad 2. Suave 3. Pulida 4. Estrías de falla	FORMA DE LA SUPERFICIE: 1. Escalonada 2. Ondulada 3. Planar	HUMEDAD EN DIACLASAS: 0. No hay posibilidad de flujo de agua 1. Discontinuidad seca sin evidencia de flujo de agua 2. Discontinuidad seca con manchas de óxido 3. Discontinuidad húmeda sin flujo de agua presente 4. Discontinuidad que muestra goteo, sin flujo de agua 5. Discontinuidad con flujo continuo de agua	ESPACHAMIENTO: 1. Excrimadamente espac (<0,20 mm) 2. Muy cerrado (20 a 60 mm) 3. Cerrado (60 a 200 mm) 4. Moderado (200 a 600 mm) 5. Amplo (600 a 2000 mm) 6. Muy amplio (2000 a 6000 mm) 7. Excrimadami espac (>6000mm)	
ANEXOS DEL FORMATO											
FOTOGRAFÍAS		Foto		Descripción		Foto		Descripción		Foto	
Foto		Foto		Descripción		Foto		Descripción		Foto	
Foto		Foto		Descripción		Foto		Descripción		Foto	



» **Formato 2.** Caracterización de unidades de suelo (Página 2)

<b>LOCALIZACIÓN:</b> En coordenadas geográficas MAGNA-SIRGAS, según origen del proyecto.			
<b>CARACTERIZACIÓN:</b> Características de la UGS que se va a cartografiar.			
<b>UNIDAD GEOLÓGICA SUPERFICIAL:</b> Nombre propuesto para la UGS a caracterizar.			
<b>SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA:</b> 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.
<b>POROSIDAD O PERMEABILIDAD CUALITATIVA:</b> Depende en gran medida de la granulometría y la gradación del material.			
CARACTERÍSTICAS DE LOS CLASTOS			
<b>FORMA Y REDONDEZ DE LOS CLASTOS:</b> Las clasificaciones intermedias para redondez no se presentan.			
FORMA	Esférica		
	Discoidal		
	Prismática		
	Tabular		
	REDONDEZ	Redondeada	Angulosa
<b>ORIENTACIÓN DE LOS CLASTOS:</b>			
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			
<b>PLASTICIDAD</b>			
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.		
<b>SUELOS FINOS:</b> Si más del 50 % del material está clasificado como finos.			
<b>RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA (Consistencia):</b> Tomado de Weltman & Head 1983.			
TÉRMINO	RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA (kN/m <sup>2</sup> )	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.	
<b>SUELOS GRUESOS:</b> Si más del 50% del material está clasificado como grueso.			
<b>DENSIDAD DE LOS SUELOS:</b> Tomado de BS 5930 1981 – Weltman & Head 1983.			
TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO		
Suelta	Puede ser excavado con pala, introducir fácilmente puntilla de 5 cm y tritarse 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 3.2.3**

# **COBERTURAS DE LA TIERRA Y USO DEL SUELO**

# 1. VERIFICACIÓN DE COBERTURAS DE LA TIERRA Y USO DEL SUELO

» **Tabla 1.** Planilla de verificación de coberturas y uso del suelo

PLANILLA DE VERIFICACIÓN DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO																					
PUNTO	ESTE	NORTE	INTERPRETE:		PERIODO DE INTERPRETACIÓN: MES/AÑO	MUNICIPIO:	SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO														
			Fecha: día / mes / año:	Cobertura			Observaciones del comportamiento de la cobertura con el inventario de procesos morfológicos	SENSOR UTILIZADO:	Uso actual del suelo	Densidad de siembra	Intensidad de uso	Técnicas de producción	Arreglo espacial	Riego	Tipo de establecimiento	Dirección de siembra	Actividad pecuaria	Restricción de uso	Afectación por uso del suelo al terreno		

NOTA: Este formato se encuentra en versión preliminar. Los atributos descritos hacen referencia a lo siguiente: "Densidad de siembra: se define si la siembra es densa o abierta." "Intensidad de uso: se identifica si el cultivo es intensivo o extensivo. Para esto se recomienda realizar algunas encuestas a la población y complementario con información secundaria descrita en el documento metodológico." "Rotación: se identifica si es permanente, semipermanente y transitoria." "Técnicas de producción: identificar si es manual o mecanizado." "Arreglo espacial: si es monocultivo, cultivos combinados o sistemas agroforestales." "Riego: se identifica con riego y sin riego y en las observaciones describir qué tipo de sistema de riego utilizan, ya sea por microaspersores, manguera, inundación o sistema lateral sobre ruedas." "Tipo de establecimiento: identifica si es a cielo abierto, palisombra o invernadero." "Dirección de siembra: si es en dirección de las curvas de nivel o en contra de las curvas de nivel." "Actividad pecuaria: si es vacuno, bufalino, porcino u ovino o sin actividad pecuaria." "Restricción de uso: hace referencia a las zonas de conservación y/o protección de carácter nacional y departamental como los parques nacionales, zonas de protección municipal o áreas especiales definidas desde el ordenamiento territorial." "Afectación por el uso del suelo al terreno: se identifica si hay afectación o no la hay, y en las observaciones describir el impacto del uso observado en función de la estabilidad. En este ítem preguntar el tiempo que llevan realizando dicho uso. Este diagnóstico se realiza de manera aleatoria con base en el recorrido de verificación de las coberturas y con la ayuda del criterio experto para definirlos.

Fuente: autores.

## 2. RELACIÓN ENTRE LA LEYENDA DE COBERTURAS DE LA TIERRA Y USOS DEL SUELO

» **Tabla 2.** Relación entre las unidades de Coberturas de la Tierra y las unidades de Uso del Suelo actual

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
<b>1. Territorios artificializados</b>	1.1 Zonas urbanizadas		Incluyen los territorios cubiertos por infraestructura urbana y todos aquellos espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas que configuran un tejido urbano. Incluye el tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo	* Asentamiento	* Residencial * Comercial
	1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación		Comprende los territorios cubiertos por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicios y comunicaciones. Se incluyen tanto las instalaciones como las redes de comunicaciones que permiten el desarrollo de los procesos específicos de cada actividad. La superficie debe ser mayor a una hectárea y el ancho de la vía debe ser superior a 14 metros	* Infraestructura	* Industrial *Infraestructura y transporte *Recreacional, deportivo o turístico * Transporte
	1.3 Zonas de extracción minera y escombreras		Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales asociados con actividades mineras, de construcción, producción industrial y vertimiento de residuos de diferente origen	* Minería  * Otros usos	*Materiales de construcción *Metales radiactivos * Minerales no metálicos * Minerales energéticos *Piedras preciosas * Disposición de materiales líquidos *Disposición de materiales sólidos * Mina en abandono
<b>2. Territorios agrícolas</b>	2.1 Cultivos transitorios		Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de solo unos pocos meses, como, por ejemplo, los cereales (maíz, trigo, cebada y arroz), los tubérculos (papa y yuca), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayor parte de las hortalizas y algunas especies de flores a cielo abierto. Tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo	* Agricultura	* Cultivos transitorios intensivos * Cultivos transitorios semintensivos * Producción
	2.2 Cultivos permanentes		Comprende los territorios dedicados a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar; se incluyen en esta categoría los cultivos de herbáceas como caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano; los cultivos arbustivos como café y cacao; y los cultivos arbóreos como palma africana y árboles frutales, los cultivos agroforestales y los cultivos confinados	* Agricultura	* Cultivo permanente intensivo * Cultivo permanente semintensivo * Producción

(.../...)



(.../...)

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE USO	USO ACTUAL	
<b>3. Áreas naturales y seminaturales</b>	3.2 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1 Áreas con vegetación herbácea	Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica. Incluye la unidad de Herbazales (Herbazonal denso de tierra firme, Herbazonal denso de tierra firme no arbolado, Herbazonal denso alto de tierra firme no arbolado, Herbazonal denso bajo de tierra firme no arbolado, Herbazonal denso de tierra firme arbolado, Herbazonal denso de tierra firme con arbustos, Herbazonal denso inundable, Herbazonal denso inundable arbolado, Arracachal, Helechal, Herbazonal abierto, Herbazonal abierto arenosos, Herbazonal abierto rocoso)	* Conservación  * Otros usos	* Protección  * Pastoreo	
		3.2.2 Áreas con vegetación arbustiva	Comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados de forma natural en diferentes densidades y sustratos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida (FAO, 2001). Abarca los Arbustales densos, Arbustal abierto, Arbustal abierto esclerófilo y Arbustal abierto mesófilo	* Conservación	* Producción  * Protección	
	3.3 Áreas abiertas sin o con poca vegetación	3.2.3 Vegetación secundaria o en transición		Comprende aquella cobertura vegetal originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria, que puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original. Se desarrolla en zonas desmontadas para diferentes usos, en áreas agrícolas abandonadas y en zonas donde por la ocurrencia de eventos naturales la vegetación natural fue destruida. No se presentan elementos intencionalmente introducidos por el hombre. Abarca la Vegetación secundaria alta y la Vegetación secundaria baja	* Agroforestal * Conservación	* Producción - Protección * Protección
					* Otros Usos	* Tierras en descanso
		3.3.1 Otras áreas sin vegetación		Comprende aquellos territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa	* Sin uso	* Afectación
		3.3.2 Afloramientos rocosos		Son áreas en las cuales la superficie del terreno está constituida por capas de rocas expuestas, sin desarrollo de vegetación, generalmente dispuestas en laderas abruptas, formando escarpes y acantilados; así como zonas de rocas desnudas relacionadas con la actividad volcánica o glaciar. Asociados con los afloramientos rocosos se pueden encontrar depósitos de sedimentos finos y gruesos, de bloques o de cenizas	* Sin uso	* Protección
		3.3.3 Tierras desnudas y degradadas		Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas	* Sin uso	* Afectación
		3.3.4 Zonas quemadas		Comprende las zonas afectadas por incendios recientes, donde los materiales carbonizados todavía están presentes. Estas zonas hacen referencia a los territorios afectados por incendios localizados tanto en áreas naturales como seminaturales, tales como bosques, cultivos, sabanas y arbustales	* Otros Usos	* Tierras en descanso

(.../...)

(…/…)

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
4. Humedales	4.1 Vegetación acuática		Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente. Incluye las unidades de Zonas pantanosas, Turberas, Vegetación acuática sobre cuerpos de agua, Pantanos costeros, Salitral y Sedimentos expuestos en bajamar	* Conservación	* Protección
				* Sin uso	* Protección
5. Superficies de agua	5.1 Aguas continentales naturales		Son cuerpos de aguas naturales permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos y estanques naturales, y cuerpos de agua en movimiento, como los ríos y canales	* Cuerpos de Agua Naturales	* Cuerpos de agua naturales
	5.2 Aguas continentales artificiales		Son cuerpos de aguas artificiales de agua dulce [no salina], embalses	* Cuerpo de Agua Artificiales	* Cuerpos de agua artificiales
	5.3 Aguas marítimas		Esta cobertura comprende los cuerpos de agua de carácter artificial, que fueron creados por el hombre para almacenar agua, usualmente con el propósito de generación de electricidad y el abastecimiento de acueductos, aunque también para prestar otros servicios, tales como control de caudales, inundaciones, abastecimiento de agua, riego, y con fines turísticos y recreativos	* Cuerpos de Agua Naturales	* Cuerpos de agua artificiales

# **Anexo 4.1**

## **SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA**

# 1. TABLA DE RELACIÓN ENTRE LA GEOMORFOLOGÍA Y COBERTURAS DE LA TIERRA

RELACIÓN TEMÁTICA DE LA GEOMORFOLOGÍA - COBERTURAS					
COBERTURAS DE LA TIERRA CLC			DEFINICIÓN	RELACIÓN TEMÁTICA SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	
1. Territorios artificializados	1.3 Zonas de extracción minera y escombreras	1.3.1 Zonas de extracción minera	1.3.1.1 Otras explotaciones mineras	Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales asociados con actividades mineras, de construcción, producción industrial y vertimiento de residuos de diferente origen. Son áreas dedicadas a la extracción de materiales minerales a cielo abierto. Incluye: arenales, canteras, gravilleras, por ejemplo, superficies de agua con área inferior a 1.25 ha, creadas por efecto de la extracción. <b>Los sitios en actividad abandonados desde hace poco tiempo, sin huella de vegetación</b>	Explotación minera (Aemc)
			1.3.1.3 Explotación de carbón		Explotación minera (Aemc)
			1.3.1.4 Explotación de oro		Explotación minera (Aemc)
			1.3.1.5 Explotación de materiales de construcción		Explotación minera (Aemc); Canteras (Ac)
			1.3.1.6 Explotación de sal		Salinas (Asa), Explotación minera (Aemc)
			1.3.1.7 Explotación de esmeraldas		Explotación minera (Aemc)
			1.3.2 Zonas de disposición de residuos		1.3.2.1 Otros sitios de disposición de residuos a cielo abierto
	1.3.2.2 Escombreras	Incluye: Vertederos públicos o de municipalidades, Vertederos industriales de residuos líquidos y sólidos. No incluye: Vertederos reconvertidos, Vertederos con área menor a 1 ha, adyacentes a las instalaciones industriales: 1.2.1.		Rellenos de escombros y/o escombreras (Are)	
	1.3.2.3 Vertederos			Planos y campos de llenos antrópicos (Ar), Llenos mixtos (Allm)	
	1.3.2.4 Relleno sanitario			Rellenos de basuras o rellenos sanitarios (Arb)	
2. Territorios agrícolas	2.3 Pastos	2.3.4 Pastos degradados	Aquellas zonas de degradación generada por erosión hídrica en la cobertura de pastos como Cárcavas, Surcos, Laminar, Terraceo (pata de vaca) y Reptación. En esta cobertura no se tendrán en cuenta los movimientos en masa	Rasgos de erosión hídrica concentrada (surcos, cárcavas, hondonadas)	
3. Bosques y áreas Seminatúrales	3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.1 Zonas arenosas naturales	3.3.1.1 Playas 3.3.1.2 Arenales	Playas: son terrenos bajos y planos constituidos principalmente por suelos arenosos y pedregosos, por lo general desprovistos de vegetación o cubiertos por una vegetación de arbustal ralo y bajo. Se encuentran conformando playas litorales y playas de ríos  Arenales: son los bancos de arena de los ríos y campos de dunas.	Albardón o diques naturales (Fa), Barra puntual (Fbp), Barra longitudinal (Fbl), Barra compuesta (Fbc), Complejo de orillales (Fco), Divagación del cauce activo (Fdc), Plano o llanura de inundación (Fpi), Dunas (Edu), Dunas antiguas (Edua), Dunas parabólicas (Edp), Dunas transversales (Edtr), Campo de dunas de sombra (Eds), Campo de dunas remontantes (Edr)

(.../...)

(.../...)

## RELACIÓN TEMÁTICA DE LA GEOMORFOLOGÍA - COBERTURAS

COBERTURAS DE LA TIERRA CLC	DEFINICIÓN	RELACIÓN TEMÁTICA SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS
3.3.2 Afloramientos rocosos	Afloramiento rocoso: son áreas en las cuales la superficie del terreno está constituida por capas de rocas expuestas, sin desarrollo de vegetación, generalmente dispuestas en laderas abruptas, formando escarpes y acantilados; así como zonas de rocas desnudas relacionadas con la actividad volcánica o glaciaria. Asociados con los afloramientos rocosos se pueden encontrar depósitos de sedimentos finos y gruesos, de bloques o de cenizas.	Esta unidad, debe tener correspondencia con unidades de roca y equivale a cualquier unidad geomorfológica desarrollada en roca, la cual se encuentra desprovista de vegetación, en general pueden ser: Escarpe de erosión mayor (Deem), Escarpe de erosión menor (Deeme), Inselberg (Di), Escarpe de línea de falla (Slfe), Escarpe de meseta (Sme), Escarpe cárstico (Kec), Torre cárstica (Ktc), Escarpe del flujo volcánico glaciado (Gfve), Aguja glacial (Horn) (Ga), Acantilado (Ma)
3.3.3 Tierras desnudas y degradadas	Tierras desnudas y degradadas: esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas.	Rasgos de erosión hídrica concentrada (surcos, cárcavas, hondonadas)
3.3.5 Zonas glaciales y nivales	Zonas glaciales y nivales: áreas cubiertas por hielo en forma permanente y por nieve en forma ocasional. La cobertura de hielo se localiza en la cima y las laderas de algunas de las montañas más altas de los Andes colombianos, por encima de la cota de nivel de 4.900 msnm. Caracterizada por presentar poca variación de su área en el tiempo, con tendencia a la lenta reducción debido al calentamiento de la atmósfera por el cambio climático, aunque eventos extremos como erupciones volcánicas pueden producir grandes pérdidas de las masas glaciares.	Cualquier unidad del ambiente glacial, estructural, fluvial o volcánico con incidencia o modelado por un glaciar o antiguo glaciar. El polígono de las zonas glaciales y nivales (cobertura) deberá ser equivalente al polígono o los polígonos del ambiente glaciario (geomorfología).
4.1.1 Humedales y Zonas pantanosas	Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente. Incluye: Pantanos colindantes con lagunas y ciénagas ubicadas en las llanuras de inundación asociadas a los ríos, que pueden estar o no interconectados, Pantanos o pantanos en transición con vegetación herbácea compuesta por juncos, canas, sauces, frecuentemente con alisos y plantas acuáticas.	Planicie y delta lacustrino (Fpla), Plano anegadizo (Fpa), Plano lacustre (Fplac), Plano y artesa lagunar (Fpl), Lago en media luna (Flm), Lagunas (Flg)
4.1.3 Vegetación acuática sobre cuerpo de agua	Pantanos de estuario que reciben aguas dulces o salobres que están recubiertos por vegetación, con área inferior a 1.56 ha, Terrenos pantanosos cubiertos por capas de sales naturales, Superficies de cantos rodados cubiertos por algas marinas, costas sin cobertura vegetal, con afloramientos rocosos, cantos rodados a acantilados con afloramientos rocosos que cubren un área menor a 1.56 ha.	Planos de inundación (zonas bajas de inundación, cubetas de derrame, swale) (Mpi), Planos y llanuras con vegetación halófila (Pantano intermareal, marismas, Pantanos de manglar, saltmarshes) (Mpv)

(.../...)

(.../...)

## RELACIÓN TEMÁTICA DE LA GEOMORFOLOGÍA - COBERTURAS

COBERTURAS DE LA TIERRA CLC		DEFINICIÓN	RELACIÓN TEMÁTICA SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS
5. Superficies de agua	5.1.1 Ríos, (quebradas y rondas)	Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río.	Cauce aluvial (Fca)
	5.1.2 Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Superficies o depósitos de agua naturales de carácter abierto o cerrado, dulce o salobre, que pueden estar conectadas o no con un río o con el mar.	Laguna costera (albufera, ensenadas, lagoons) (Mlc), Laguna volcánica (Vlg), Laguna Glacial (Glg), Laguna (Flg), Ciénaga (Fc)
	5.1.3 Canales (Vallados y acequias)	Cauce artificial abierto que contiene agua en movimiento de forma permanente, que tiene un ancho mínimo de 14 m y que puede enlazar o no dos masas de agua. Comprende los canales de navegación y de los distritos de riego.	Canal Artificial (Aca)
	5.1.4.1 Embalses	Esta cobertura comprende los cuerpos de agua de carácter artificial, que fueron creados por el hombre para almacenar agua, usualmente con el propósito de generación de electricidad y el abastecimiento de acueductos, aunque también para prestar otros servicios, tales como control de caudales, inundaciones, abastecimiento de agua, riego, y con fines turísticos y recreativos.	Embalses (Aemb)
	5.1.4.2 Estanques para acuicultura continental		Excavaciones (Ase), Estanques (Ae)
5.2 Aguas marítimas	5.2.1 Lagunas costeras	Superficies de agua salada a salobre, separadas del mar por tierras sobresalientes u otras topografías similares. Pueden tener comunicación con el mar de manera permanente a temporal a través de canales, barras de arena y zonas de pantanos costeros.	Laguna costera (albufera, ensenadas, lagoons) (Mlc)
	5.2.3 Estanques para acuicultura marina	Cuerpos de agua artificial destinados a la cría de crustáceos y peces. Se ubican, generalmente, en las regiones adyacentes al mar.	Excavaciones (Ase), Estanques (Ae)

**Nota:** La relación temática se refiere a las características similares en la identificación que puedan tener las subunidades de geomorfología con las unidades de coberturas de la tierra y que tienen una correspondencia espacial o cartográfica en ambos mapas, con el fin de alistar la información para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa. Por ejemplo, si en el mapa de coberturas de la tierra se interpreta una unidad de cobertura como explotación de hidrocarburos, explotación de carbón, explotación de oro, explotación de materiales de construcción o explotación de sal, posiblemente estas unidades correspondan con subunidades geomorfológicas como explotación minera (Aemc), canteras (Ac) o Salinas (Asa) y deberá existir una correspondencia en función del área que las representa; otro ejemplo es el de los cuerpos de agua. En el proceso final de la representación cartográfica de cada uno de los mapas debe de existir una interacción entre los temáticos para garantizar de todas las capas de información elaboradas. Estas relaciones son establecidas solo con fines de análisis y zonificación de amenaza por movimientos en masa y no afectan el contenido final de los mapas de cada temática.

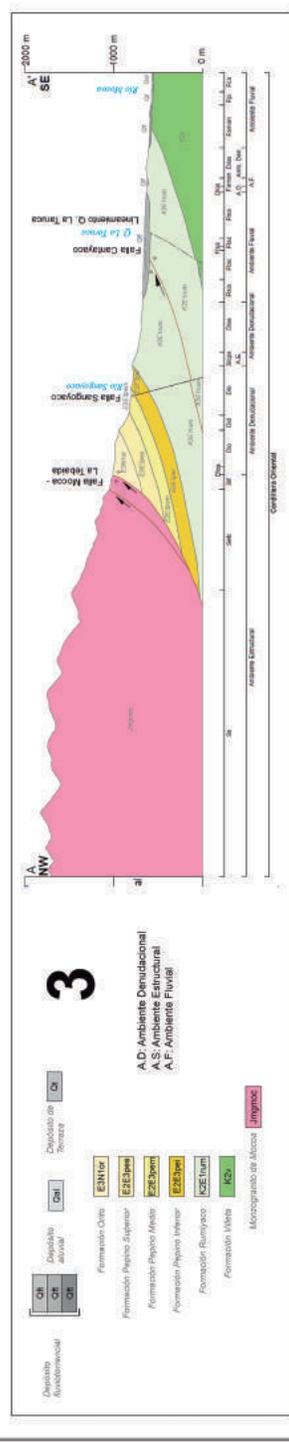
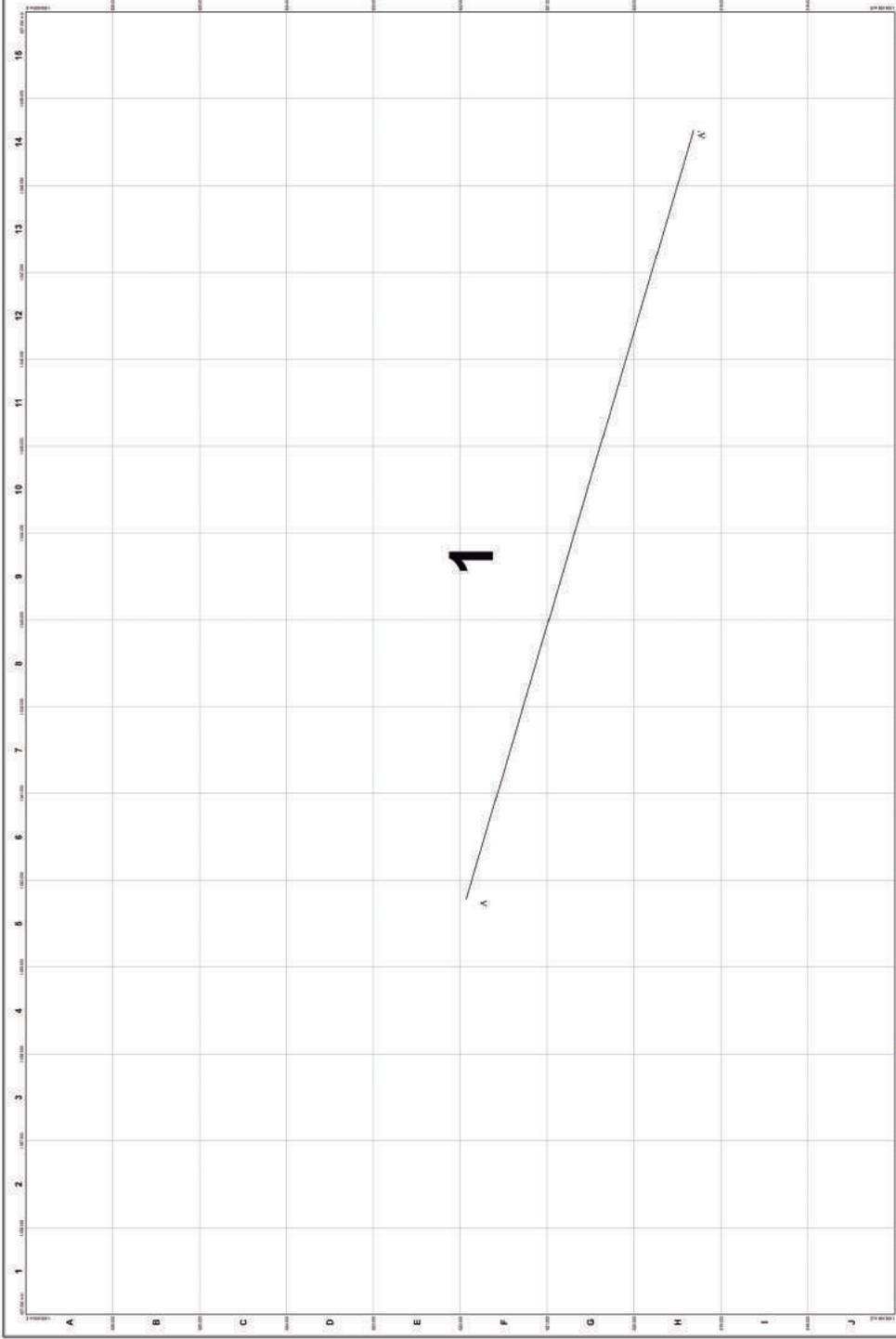
**Anexo 6.1**  
**PRESENTACIÓN DE**  
**MAPAS FINALES**



# 1. MAPA DE INVENTARIO DE PROCESOS MORFODINÁMICOS

## 1.1 Descripción del contenido del mapa

1. **Espacio para el mapa de inventario de procesos morfodinámicos:** Debe ir con su respectiva grilla de coordenadas proyectadas en el sistema y origen correspondiente.
2. **Leyenda del mapa de inventario de procesos morfodinámicos:** los diferentes atributos del mapa con su respectiva descripción.
3. **Metodología aplicada:** Se incluye un párrafo introductorio en el cual se menciona lo que presenta el mapa y a nivel general cuáles fueron las principales fuentes a partir de las cuales se obtuvo la información. El siguiente párrafo corresponde a una enumeración de los pasos metodológicos que fueron seguidos para la construcción del mapa, incluyendo tanto las principales actividades desarrolladas en orden cronológico, como los insumos y su escala, software y principales criterios técnicos utilizados para la identificación y representación de cada uno de los movimientos en masa. **Ejemplo:** Este mapa de inventario de procesos morfodinámicos para las *"Cuencas de las quebradas Taruca, San Antonio y El Carmen y los ríos Sangoyaco y Mulato en el municipio de Mocoa-Putumayo"*, contiene los movimientos en masa, procesos erosivos y rasgos geomorfológicos registrados a partir de interpretación de imágenes de sensores remotos, información secundaria como informes y estudios técnicos y levantamiento de campo. En el proceso metodológico para la construcción de este mapa se siguieron los siguientes pasos:
  - (1)
  - (2)
  - (3)
  - .
  - .
  - .
  - ....
4. **Notas:** En este espacio deben incluirse notas aclaratorias referentes al mapa y su contenido, aspectos que se considere importante mencionar y que no hayan quedado incluidos en los otros espacios de texto. **Ejemplo:** Cartografía básica a escala 1:25.000 suministrada por el IGAC y restituida con fotografías aéreas del año 2000. En este mapa un (1) cm<sup>2</sup> representa 6,25 Ha del terreno. El label del MM indica el mecanismo del movimiento y su color representa si fue verificado en campo o no.
5. **Alcance:** Describir brevemente el alcance del mapa. **Ejemplo:** Este mapa es una herramienta de planificación regional (escala 1:25.000) y puede ser usado para evaluaciones preliminares de intervenciones o desarrollos de infraestructura a gran escala, así como, para la planificación de procesos de gestión de riesgo a escalas más detalladas (1:10.000, 1:5.000, etc.). Es el punto de partida para la ejecución de estudios y análisis de escenarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escalas detalladas, y en ningún caso los reemplaza. El alcance de este mapa es de información y descripción, de condicionamiento del uso del suelo y de ordenamiento a escala regional, pero no debe usarse con carácter restrictivo sin la ejecución de estudios de detalle. El desarrollo de infraestructura está sujeto a la realización de estudios de riesgo que incluyan la definición de medidas de mitigación.
6. **Fuentes de Información:** Se deben incluir todas las fuentes de información utilizadas para la identificación y representación espacial de cada uno de los movimientos en masa, ya sea fuentes de información secundaria como estudios, informes técnicos y bases de datos que contengan inventarios de movimientos en masa (nombre del informe o base de datos, el año y la entidad que lo elaboró), como también los tipos de imágenes de sensores remotos que fueron interpretadas (el tipo de imagen y la fecha de la misma) y si hubo levantamiento de campo también se incluirá esta fuente. **Ejemplo:**
  - (1) Fotografías aéreas del 10 de febrero del año 2000. Si se tienen los números de vuelos se deben colocar.
  - (2) Imágenes Landsat 8 del 1° de enero de 2010.
  - (3) Modelo digital de elevación SRTM con una resolución espacial de 30 metros.
  - (4) Servicio de imágenes de Google Earth (Digital Globe) del 27 de enero de 2014
  - (5) Informes técnicos: título, fecha y entidad que lo elaboró.
  - (6) Imágenes Radarsat del 10 de enero de 2010
  - (7) Sistema de Información de Movimientos en Masa SIMMA del Servicio Geológico Colombiano
7. **Convenciones:** En este espacio se deben incluir todas las convenciones tanto de cartografía base como las relacionadas con rasgos geomorfológicos, con su respectiva descripción.
8. **Índice de hojas adyacentes:** localización del área del mapa con respecto a las planchas adyacentes. Aquí se debe incluir información referente al sistema de referencia y origen de coordenadas del mapa, así como también la forma de citar el mismo.
9. **Mapa de Localización:** Mapa de Colombia con la localización geográfica del área de interés que está representada en el mapa de inventario de procesos morfodinámicos.
10. **Rótulo y logos:** Aquí debe ir el nombre del mapa, entidades participantes con sus respectivos logos, autores del mapa y lo referente a la escala del mismo, edición y fecha.



**3**

**A.D. Ambiente Denudacional**  
**A.S. Ambiente Estructural**  
**A.F. Ambiente Pluvial**

Deposito fluvioestacional  
 Deposito aluvial  
 Deposito de Renaca  
 Formación Otco  
 Formación Payagu Superior  
 Formación Payagu Medio  
 Formación Payagu Inferior  
 Formación Runyaco  
 Formación Mito  
 Microgranito de Mito

**4**

**Constricciones**

Deposito de arena  
 Lodo  
 Lodo arcilloso  
 Lodo de Deposito  
 Lodo de Deposito

**5**

Mapa de la zona de estudio

**6**

Mapa de la zona de estudio

AMBIENTE	CODIGO	SUBUNIDAD	DESCRIPCION
DENUDACIONAL	D1a	Cuarcas terciarias	
	D1b	Cuarcas	
	D2a	Llanos terciarios	
	D2b	Llanos terciarios bajos	
	D2c	Escarpes terciarios	
	D2d	Llanos terciarios	
	D2e	Llanos terciarios	
	D2f	Llanos terciarios	
	D2g	Llanos terciarios	
	D2h	Llanos terciarios	
PLUVIAL	P1a	Formación Otco	
	P1b	Formación Payagu Superior	
	P1c	Formación Payagu Medio	
	P1d	Formación Payagu Inferior	
	P1e	Formación Runyaco	
	P1f	Formación Mito	
	P1g	Formación Mito	
	P1h	Formación Mito	
	P1i	Formación Mito	
	P1j	Formación Mito	
ESTRUCTURAL	E1a	Formación Otco	
	E1b	Formación Payagu Superior	
	E1c	Formación Payagu Medio	
	E1d	Formación Payagu Inferior	
	E1e	Formación Runyaco	
	E1f	Formación Mito	
	E1g	Formación Mito	
	E1h	Formación Mito	
	E1i	Formación Mito	
	E1j	Formación Mito	
ANTRÓPICOS	A1a	Formación Otco	
	A1b	Formación Payagu Superior	
	A1c	Formación Payagu Medio	
	A1d	Formación Payagu Inferior	
	A1e	Formación Runyaco	
	A1f	Formación Mito	
	A1g	Formación Mito	
	A1h	Formación Mito	
	A1i	Formación Mito	
	A1j	Formación Mito	

www.gov.co

**SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO**

**MAPA DE SUBUNIDADES GEOMORFOLOGICAS DE LOS RIOS SAN ANTONIO, CARMEN Y LOS RIOS SANGAYACO Y MILATO MOCOA, PUTUMAYO**

**8**

Escala 1:25,000

Proyecto 1000

2017

**7**

Mapa de Localización

Información de Referencia

Este mapa fue elaborado por el Servicio Geológico Colombiano, en el marco del proyecto de desarrollo de mapas de subunidades geomorfológicas de los ríos San Antonio, Carmen y los ríos Sangayaco y Milato, Mocoa, Putumayo, a escala 1:25,000.

## 2. MAPA DE SUBUNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

---

### 2.1 Descripción del contenido del mapa

- 1. Espacio para el mapa de Subunidades Geomorfológicas:** Debe ir con su respectiva grilla de coordenadas proyectadas en el sistema y origen correspondiente. Se debe incluir la línea trazada para la elaboración del perfil geomorfológico con las letras en sus extremos para orientar el perfil.
- 2. Leyenda de Subunidades Geomorfológicas:** Incluye el ambiente, código (siglas y color de la subunidad), nombre de la subunidad geomorfológica y la descripción de dicha subunidad. En la descripción de cada subunidad es importante tratar aspectos de la distribución geográfica de la subunidad, así como características morfométricas, morfológicas, litológicas, estructurales (para las de este tipo de ambiente morfogenético), y además aspectos relacionados con la morfodinámica como la presencia de procesos erosivos (tipos de procesos) y la presencia de movimientos en masa indicando los tipos predominantes.
- 3. Perfil Geomorfológico:** En este espacio se plasma el perfil geomorfológico debidamente orientado con respecto al Norte, el cual incluye el perfil geológico del subsuelo con unidades litoestratigráficas regionales y las estructuras geológicas y en la parte inferior su relación correspondiente con las jerarquías geomorfológicas: provincia, ambiente y subunidad geomorfológica. Así mismo debe incluirse la respectiva leyenda del perfil geológico.
- 4. Convenciones:** En este espacio se deben incluir todas las convenciones tanto de cartografía base como las relacionadas con rasgos geomorfológicos y las estructuras representadas en el perfil geomorfológico, con su respectiva descripción.
- 5. Notas:** En este espacio deben incluirse notas aclaratorias referentes al mapa y su contenido, aspectos que se considere importante mencionar y que no hayan quedado incluidos en los otros espacios de texto. Ejemplo: Cartografía básica a escala 1:25.000 suministrada por el IGAC y restituida con fotografías aéreas del año 2000. En este mapa un (1) cm<sup>2</sup> representa 6,25 Ha del terreno. El perfil geológico representa las Unidades Litoestratigráficas, relacionadas con las Subunidades Geomorfológicas, las cuales se muestran en la base del mismo. La cuenca de la quebrada Taruca incluye la subcuenca de la quebrada Taruquita.
- 6. Índice de hojas adyacentes:** Localización del área del mapa con respecto a las planchas adyacentes. Aquí se debe incluir la forma de citar la referencia bibliográfica del mismo.
- 7. Mapa de Localización:** Mapa de Colombia con la localización geográfica del área de interés que está representada en el mapa de subunidades geomorfológicas. Aquí se debe incluir información referente al sistema de referencia y origen de coordenadas del mapa.
- 8. Rótulo y logos:** Aquí debe ir el nombre del mapa, entidades participantes con sus respectivos logos, autores del mapa y lo referente a la escala del mismo, edición y fecha.

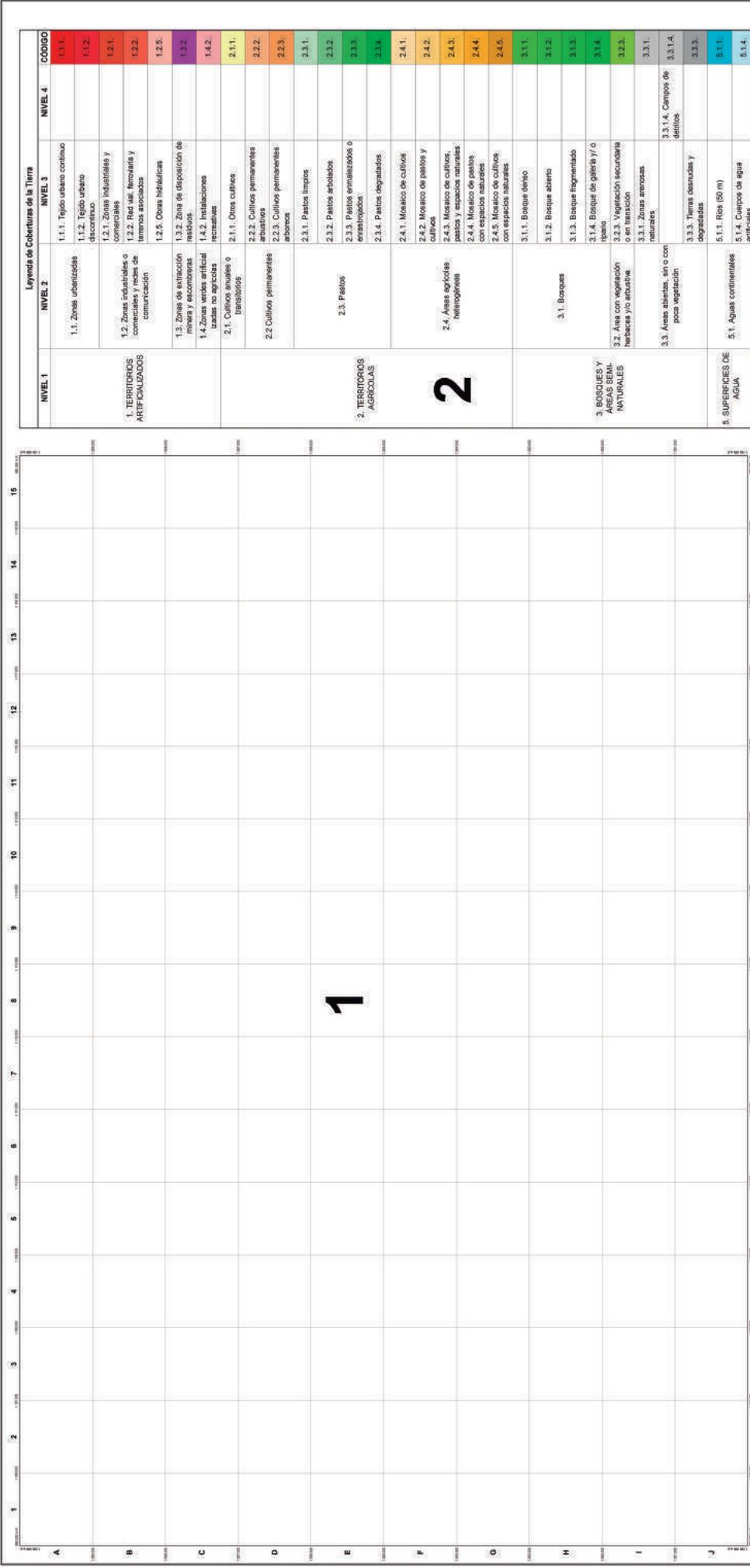


### 3. MAPA DE UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

---

#### 3.1 Descripción del contenido del mapa

- 1. Espacio para el mapa de Unidades Geológicas Superficiales:** Debe ir con su respectiva grilla de coordenadas proyectadas en el sistema y origen correspondiente. Se debe incluir la línea trazada para la elaboración del corte geológico con las letras en sus extremos para orientar el perfil.
- 2. Leyenda de Unidades Geológicas Superficiales:** Incluye el tipo de material (suelo - roca), el nombre de la unidad geológica superficial, la convención de la unidad (siglas y color) y la respectiva descripción. Para realizar la descripción de cada unidad tanto de roca como suelo se recomienda seguir los lineamientos que se proponen en el numeral 3.2.2. del documento de la Guía Metodológica y también en el Anexo 3.2.2. de Unidades Geológicas Superficiales.
- 3. Perfil Geomorfológico:** en este espacio se plasma el corte geológico debidamente orientado con respecto al Norte, el cual incluye el perfil geológico del subsuelo con unidades litoestratigráficas regionales y las estructuras geológicas y su respectiva leyenda.
- 4. Convenciones:** En este espacio se deben incluir todas las convenciones tanto de cartografía base como las relacionadas con estructuras geológicas tanto del mapa como del perfil geológico con su descripción.
- 5. Notas:** En este espacio deben incluirse notas aclaratorias referentes al mapa y su contenido, aspectos que se considere importante mencionar y que no hayan quedado incluidos en los otros espacios de texto. Ejemplo: Cartografía básica a escala 1:25.000 suministrada por el IGAC y restituida con fotografías aéreas del año 2000. En este mapa un (1) cm<sup>2</sup> representa 6,25 Ha del terreno. El perfil geológico representa las unidades litoestratigráficas, relacionadas con las Unidades Geológicas Superficiales, las cuales se muestran en la parte superior. La cuenca de la quebrada Taruca incluye la subcuenca de la quebrada Taruquita.
- 6. Índice de hojas adyacentes:** localización del área del mapa con respecto a las planchas adyacentes. Aquí se debe incluir la forma de citar la referencia bibliográfica del mismo.
- 7. Mapa de Localización:** Mapa de Colombia con la localización geográfica del área de estudio del mapa de unidades geológicas superficiales. Aquí se debe incluir información referente al sistema de referencia y origen de coordenadas del mapa.
- 8. Rótulo y logos:** Aquí debe ir el nombre del mapa, entidades participantes con sus respectivos logos, autores del mapa y lo referente a la escala del mismo, edición y fecha.



**Metodología aplicada:**

**Notas:**

**Alcance:**

**Fuentes de información:**

**Mapa de Coberturas de la Tierra**

**9**

**10**

**MAPA DE COBERTURAS DE LA TIERRA DE LA PLANCHA 501ID**

**SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO**

Elaborado por:  
Grupo de Análisis por Nivelación en Mapa  
Dirección Técnica de Geomática

Escala: 1:100,000

2015

**Metodología aplicada:**

**Notas:**

**Alcance:**

**Fuentes de información:**

**Mapa de Coberturas de la Tierra**

**8**

**11**

**SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO**

Elaborado por:  
Grupo de Análisis por Nivelación en Mapa  
Dirección Técnica de Geomática

Escala: 1:100,000

2015

## 4. MAPA DE COBERTURA DE LA TIERRA

### 4.1 Descripción del contenido del mapa

1. **Espacio para el mapa de Cobertura de la Tierra:** Debe ir con su respectiva grilla de coordenadas proyectadas en el sistema y origen correspondiente.
2. **Leyenda del mapa de Cobertura de la Tierra:** los diferentes atributos del mapa con su respectiva descripción.
3. **Metodología aplicada:** Se incluye un párrafo introductorio en el cual se menciona lo que presenta el mapa y a nivel general cuáles fueron las principales fuentes a partir de las cuales se obtuvo la información. El siguiente párrafo corresponde a una enumeración de los pasos metodológicos que fueron seguidos para la construcción del mapa, incluyendo tanto las principales actividades desarrolladas en orden cronológico, como los insumos y su escala, software y principales criterios técnicos utilizados para la identificación y representación de cada uno de los movimientos en masa.
4. **Notas:** En este espacio deben incluirse notas aclaratorias referentes al mapa y su contenido, aspectos que se considere importante mencionar y que no hayan quedado incluidos en los otros espacios de texto. **Ejemplo:** Cartografía básica a escala 1:25.000 suministrada por el IGAC y restituída con fotografías aéreas del año 2000. En este mapa un (1) cm<sup>2</sup> representa 6,25 Ha del terreno.
5. **Alcance:** Describir brevemente el alcance del mapa. **Ejemplo:** Este mapa es una herramienta de planificación regional (escala 1:25.000) y puede ser usado para evaluaciones preliminares de intervenciones o desarrollos de infraestructura a gran escala, así como, para la planificación de procesos de gestión de riesgo a escalas más detalladas (1:10.000, 1:5.000, etc.). Es el punto de partida para la ejecución de estudios y análisis de escenarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escalas detalladas, y en ningún caso los reemplaza. El alcance de este mapa es de información y descripción, de condicionamiento del uso del suelo y de ordenamiento a escala regional, pero no debe usarse con carácter restrictivo sin la ejecución de estudios de detalle. El desarrollo de infraestructura está sujeto a la realización de estudios de riesgo que incluyan la definición de medidas de mitigación.
6. **Fuentes de Información:** Se deben incluir todas las fuentes de información utilizadas para la identificación y representación espacial de cada uno de los movimientos en masa, ya sea fuentes de información secundaria como estudios, informes técnicos y bases de datos que contengan inventarios de movimientos en masa (nombre del informe o base de datos, el año y la entidad que lo elaboró), como también los tipos de imágenes de sensores remotos que fueron interpretadas (el tipo de imagen y la fecha de la misma) y si hubo levantamiento de campo también se incluirá esta fuente. **Ejemplo:**
  - (1) Fotografías aéreas del 10 de febrero del año 2000. Si se tienen los números de vuelos se deben colocar.
  - (2) Imágenes Landsat 8 del 1° de enero de 2010.
  - (3) Modelo digital de elevación SRTM con una resolución espacial de 30 metros.
  - (4) Servicio de imágenes de Google Earth (Digital Globe) del 27 de enero de 2014.
  - (5) Informes técnicos: título, fecha y entidad que lo elaboró.
  - (6) Imágenes Radarsat del 10 de enero de 2010.
  - (7) Sistema de Información de Movimientos en Masa SIMMA del Servicio Geológico Colombiano.
7. **Convenciones:** En este espacio se deben incluir todas las convenciones de la cartografía base.
8. **Índice de hojas adyacentes:** localización del área del mapa con respecto a las planchas adyacentes. Aquí se debe incluir información referente al sistema de referencia y origen de coordenadas del mapa, así como también la forma de citar el mismo.
9. **Mapa de Localización:** Mapa de Colombia con la localización geográfica del área de estudio.
10. **Rótulo y logos:** Aquí debe ir el nombre del mapa, entidades participantes con sus respectivos logos, autores del mapa y lo referente a la escala del mismo, edición y fecha.



## 5. MAPA DE USOS DEL SUELO

### 5.1 descripción del contenido del mapa

1. Espacio para el mapa de Uso del Suelo: **Debe ir con su respectiva grilla de coordenadas proyectadas en el sistema y origen correspondiente.**
2. **Leyenda del mapa de Uso del Suelo:** Los diferentes atributos del mapa con su respectiva descripción.
3. **Metodología aplicada:** Realizar una descripción general del contenido del mapa de Usos del suelo, en el marco de la metodología IGAC, 2003 adaptada por el Ministerio del Medio Ambiente en el año 2014, donde se incluyen los insumos, información de apoyo, nivel de confiabilidad, observaciones y las mayores dificultades del proceso. En caso de utilizar herramientas informáticas adicionales, realizar la respectiva descripción. Describir la rutina de control de calidad cartográfica y temática realizada, tal como: Topología, polígonos adyacentes y áreas mínimas menores a la unidad mínima de mapeo. **Por ejemplo:** Este mapa contiene las coberturas de uso del suelo de la parte norte de la cuenca del Río Claro para el año 2017, de acuerdo con la metodología IGAC, 2003 adaptada por el ministerio del medio ambiente en el año 2014, con la leyenda a nivel de tipo y clase de uso. El mapa se elaboró a partir del mapa de coberturas de la tierra del año 2017, se utilizaron apoyos tales como fotografías aéreas del año 2015, revisión de información secundaria y se realizó verificación de campo en el 15% del área de estudio en el marco de la metodología descrita. En la unidad de uso del suelo se incluye el color de la cobertura, teniendo en cuenta el style de colores oficial a nivel nacional de las coberturas 1:100.000.
4. **Notas:** En este espacio deben incluirse notas aclaratorias referentes al mapa y su contenido, aspectos que se considere importante mencionar y que no hayan quedado incluidos en los otros espacios de texto. **Por ejemplo:** En este mapa un (1) cm<sup>2</sup> representa 6,25 Ha del terreno.
5. **Alcance:** Describir brevemente el alcance del mapa. **Ejemplo:** Este mapa es un producto que define el factor condicionante de uso del suelo y puede incluirse como insumo para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000. El alcance de este mapa es de información y descripción del uso del suelo a escala regional y puede usarse como apoyo a la planificación en el marco del ordenamiento territorial a nivel rural.
6. **Fuentes de Información:** Se deben incluir todas las fuentes de información utilizadas en la definición de la unidad de uso, diferenciando apoyos, tales como fotografías aéreas, información secundaria, análisis de la información en campo, entre otros. Todas las fuentes de información deben estar descritas de acuerdo con su origen, técnicas de adquisición, escala, resolución, fechas de elaboración u obtención, autores, entre otros.
7. **Convenciones:** En este espacio se deben incluir todas las convenciones de la cartografía base.
8. **Índice de hojas adyacentes:** Localización del área del mapa con respecto a las planchas adyacentes. Aquí se debe incluir información referente al sistema de referencia y origen de coordenadas del mapa, así como también la forma de citar el mismo.
9. **Mapa de Localización:** Mapa de Colombia con la localización geográfica del área de estudio.
10. **Rótulo y logos:** Aquí debe ir el nombre del mapa, entidades participantes con sus respectivos logos, autores del mapa y lo referente a la escala del mismo, edición y fecha.



## 6. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

### 6.1 Descripción del contenido del mapa

1. **Espacio para el mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa:** Debe ir con su respectiva grilla de coordenadas proyectadas en el sistema y origen correspondiente.
2. **Leyenda del mapa:** los diferentes atributos del mapa con su respectiva descripción, entre ellos, las categorías de susceptibilidad para cada tipo y subtipo de movimiento en masa asociándolos con los factores condicionantes y características geoambientales que los generan en el área estudiada. Se incluyen los colores y representación para cada categoría de susceptibilidad, así como los rasgos geomorfológicos y la simbología para los movimientos en masa.
3. **Metodología aplicada:** Realizar una descripción general del contenido del mapa y la zona de estudio, así como del método o métodos aplicados para el análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa.

Describir las etapas y actividades realizadas para la elaboración del mapa de susceptibilidad, junto con aspectos como insumos temáticos y software utilizado, así como criterios para el análisis y procedimientos aplicados. Es importante incluir una descripción sobre la calidad de la información disponible, específicamente la relacionada con la elaboración o disponibilidad de cartografía temática y el inventario de procesos morfodinámicos. **Por ejemplo:** En este mapa se presenta la susceptibilidad por movimientos en masa de la parte norte de la cuenca del Río Claro, el cual se ha construido a partir de un inventario histórico de movimientos en masa usando una combinación de análisis estadísticos y heurísticos. El inventario de movimientos en masa fue construido a partir de análisis de archivos históricos e interpretación de imágenes de satélite entre los años 1990 y 2000, suministradas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Se utilizaron las siguientes coberturas de información temática para el análisis, las cuales fueron construidas en el marco de este proyecto:

- Modelo de pendientes
- Unidades Geológicas Superficiales
- Coberturas de la tierra (2015)

El método utilizado para analizar la relación entre las características geoambientales del área de estudio y los movimientos en masa identificados fue Pesos de Evidencia. La versión final del mapa fue elaborada en ArcGIS.

4. **Alcance:** Describir brevemente el alcance del mapa. Ejemplo: Este mapa es el punto de partida para la ejecución de estudios y análisis de escenarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escalas detalladas, y en ningún caso lo reemplaza. El alcance de este mapa es de información y descripción, de condicionamiento del uso del suelo y de ordenamiento a escala regional, pero no debe usarse con carácter restrictivo sin la ejecución de estudios de detalle.
5. **Notas:** En este espacio deben incluirse notas aclaratorias referentes al mapa y su contenido, aspectos que se considere importante mencionar y que no hayan quedado incluidos en los otros espacios de texto. Ejemplo: En este mapa un (1) cm<sup>2</sup> representa 6,25 Ha del terreno.
6. **Fuentes de Información:** Se deben incluir todas las fuentes de información utilizadas en el proceso de zonificación de susceptibilidad, específicamente las relacionadas con insumos cartográficos y temáticos tales como cartografía base, Bases de Datos de Inventario, Modelo Digital de Elevación, Cartografía temática disponible, entre otros. Todas las fuentes de información deben estar descritas de acuerdo con su origen, técnicas de adquisición y procesamiento, escala, resolución, fechas de elaboración u obtención, autores, entre otros.
7. **Convenciones:** En este espacio se deben incluir todas las convenciones de la cartografía base.
8. **Índice de hojas adyacentes:** localización del área del mapa con respecto a las planchas adyacentes. Aquí se debe incluir información referente al sistema de referencia y origen de coordenadas del mapa, así como también la forma de citar el mismo.
9. **Mapa de Localización:** Mapa de Colombia con la localización geográfica del área de estudio.
10. **Rótulo y logos:** Aquí debe ir el nombre del mapa, entidades participantes con sus respectivos logos, autores del mapa y lo referente a la escala del mismo, edición y fecha.



## 7. MAPA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

### 7.1 Descripción del contenido del mapa

- 1. Espacio para el mapa de Amenaza por Movimientos en Masa:** Debe ir con su respectiva grilla de coordenadas proyectadas en el sistema y origen correspondiente.
- 2. Leyenda del mapa:** Se incluyen las categorías de amenaza para cada tipo y subtipo de movimiento en masa con una descripción general de la categoría de amenaza (estadísticas y localización geográfica) relacionando la probabilidad espacial – porcentaje de movimientos en masa y la probabilidad temporal – frecuencia de ocurrencia, también se recomienda incluir aspectos relacionados con las magnitudes esperadas y algunas recomendaciones. También se debe incluir la simbología relacionada con los diferentes tipos de movimientos en masa representados en el mapa y las diferentes categorías de amenaza en relación dichos tipos de movimientos.
- 3. Metodología aplicada:** Realizar una descripción general del contenido del mapa y la zona de estudio, así como del método aplicado tanto para el análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa, como los criterios y procedimientos aplicados para la caracterización de la amenaza por movimientos en masa para cada escenario considerado según lo descrito en el numeral 5.4 de la Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza. Es importante incluir una descripción sobre las incertidumbres relacionadas con la calidad y cantidad de información disponible para el cálculo de probabilidades y magnitudes de los procesos estudiados.
- 4. Alcance:** Describir brevemente el alcance del mapa. Ejemplo: Este mapa es el punto de partida para la ejecución de estudios y análisis de escenarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escalas detalladas, y en ningún caso los reemplaza. El alcance de este mapa es de información y descripción, de condicionamiento del uso del suelo y de ordenamiento a escala regional, pero no debe usarse con carácter restrictivo sin la ejecución de estudios de detalle.
- 5. Notas:** En este espacio deben incluirse notas aclaratorias referentes al mapa y su contenido, aspectos que se considere importante mencionar y que no hayan quedado incluidos en los otros espacios de texto. Ejemplo: En este mapa un (1) cm<sup>2</sup> representa 6,25 Ha del terreno.
- 6. Fuentes de Información:** Se deben describir las fuentes de información utilizadas en el proceso de zonificación de amenaza, especialmente las relacionadas con el catálogo histórico y el inventario de movimientos en masa, a partir de las cuales se obtuvieron los datos para la caracterización de la amenaza.
- 7. Convenciones:** En este espacio se deben incluir todas las convenciones de la cartografía base.
- 8. Índice de hojas adyacentes:** localización del área del mapa con respecto a las planchas adyacentes. Aquí se debe incluir información referente al sistema de referencia y origen de coordenadas del mapa, así como también la forma de citar el mismo.
- 9. Mapa de Localización:** Mapa de Colombia con la localización geográfica del área de estudio.
- 10. Rótulo y logos:** Aquí debe ir el nombre del mapa, entidades participantes con sus respectivos logos, autores del mapa y lo referente a la escala del mismo, edición y fecha.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaska Satellite Facility (ASF). (2015). *ASF Radiometric Terrain Corrected Products: Algorithm Theoretical Basis Document*. Recuperado de [https://media.asf.alaska.edu/uploads/RTC/rtc\\_atbd\\_v1.2\\_final.pdf](https://media.asf.alaska.edu/uploads/RTC/rtc_atbd_v1.2_final.pdf)
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21-44. doi: 10.1007/s100640050066
- American Society for Testin Materials (ASTM). (2000). *ASTM D2487 - 00: Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society for Testin Materials (ASTM). (2006). *ASTM D2487 - 06: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken: ASTM. doi: 10.1520/D2487-06
- Armenteras, D., & Rodríguez Eraso, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latinoamérica: Una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, 17(2), 233-246.
- Australian Geomechanics Society (AGS). (2007). Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Journal and News of the Australian Geomechanics Society*, 42(1), 13-36.
- Blahut, J., van Westen, C. J., & Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, 19(1), 36-51.
- Bonham Carter, G. F. (1994). *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS* (vol. 13). Ottawa: Pergamon Press.
- Cabrera, E., Vargas, D. M., Galindo, G., García, M. C., & Ordoñez, M. F. (2011). *Memoria técnica de la cuantificación de la deforestación histórica nacional – escalas gruesa y fina*. Bogotá: IDEAM.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., et al. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 57-72. doi: 10.5194/nhess-2-57-2002
- Cardona Arboleda, O. D. (2013). Parte I: Piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidroclimatológicos en el ordenamiento territorial municipal - Incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial instructivo para el nivel municipal. En: *Piloto de Asistencia Técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidroclimatológicos en el ordenamiento territorial municipal* (pp. 6-50). Bogotá.
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15, 403-426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS Technology in Mapping Landslide Hazard. In A. Carrara, & F. Guzzetti, *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* (vol. 5, pp. 135-175). Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. doi: 10.1007/978-94-015-8404-3\_8
- Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Cas, R. F. & Wright, J. V. (1987). *Volcanic successions, modern and ancient*. London: Allen and Unwin Ltd.
- Castellanos, J. R. (1996). *Lluvias críticas en la evaluación de amenazas de eventos de remoción en masa*. Tesis de Magíster. Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia.
- Castro, P. (2014). *Cambios de Uso con ArcGis 10.2*. (P. Castro, Producer). Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=0iPYojhm6ZA>

- Charman, P. V., & Murphy, B. W. (2000). *Soils: their properties and management* (2nd ed.). Melbourne y Oxford: Oxford University Press.
- Chen, C. Y., & Yu, F. C. (2011). Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology*, 129(3-4), 387-397. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.03.002
- Chung, C. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazard*, 30, 451-472.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Segunda ed.). Madrid: Ediciones Rialp. S.A.
- Chuvieco, E. (1998). *El Factor Temporal en Teledetección: Evolución Fenomenológica y Análisis de Cambios*. (U. d. Alcalá, Ed.) Recuperado de: [http://telenet.uva.es/promotores/revista/revista\\_10/AET10\\_4.pdf](http://telenet.uva.es/promotores/revista/revista_10/AET10_4.pdf)
- Coe, A. L., Argles, T. W., Rothery, D. A. & Spicer, R. A. (2010). *Geological Field Techniques*. Malaysia: Willey - Blackwell Publishing Ltd.
- Conforti, M., Robustelli, G., Muto, F., & Critelli, S. (2012). Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vitravo river catchment (Calabria, south Italy). *Natural Hazards*, 61(1), 127-141.
- Congreso de la República de Colombia. (1994). Ley 136 de 1994. *Diario Oficial No. 41.377*.
- Congreso de la República de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997. *Diario Oficial No. 43.091*.
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012. *Diario Oficial No. 48.411*.
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1551 de 2012. *Diario Oficial No. 48.483*.
- Corina Pineda, M., Martínez Casanovas, J. A., & Vilorio, J. (2016). Relación entre los cambios de cobertura vegetal y la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la serranía del interior, Venezuela. *Interciencia*, 41(3), 7.
- Corominas, J., & Mavrouli, O. (2011a). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk assessment and zoning. *Safeland Project - Deliverable D2.4*.
- Corominas, J., & Mavrouli, O. (2011b). Recommended Procedures for Validating Landslide Hazard and Risk Models and Maps. *SafeLand - Deliverable D2.8*.
- Corominas, J., & Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102, 193-213.
- Corominas, J., Einstein, H., Davis, T., Strom, A., Zuccaro, G., Nadim, F., et al. (2015). Glossary of Terms on Landslide Hazard and Risk. In G. Lollino, D. Giordan, G. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski, et al, *Engineering Geology for Society and Territory* (vol. 2, pp. 1775-1779). Cham: Springer International Publishing.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulos, S., et al. (2013). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263.
- Crosta, G. (1990). A study of slope movements caused by heavy rainfall in Valtellina (Italy - July 1987). In A. Cancelli (Ed.), *Proceedings of the 6th International Conference and Field Workshop on Landslides ALPS*. Milano: Ricerca Scientifica ed Educazione Permanente.
- Crovelli, R. A. (2000). *Probability Models for Estimation of Number and Costs of Landslides*. Open - File Report 00 - 249. Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Lanslides: Investigation and Mitigation. Chapter 3: Landslide Types and Processes*. Special Report - National Research Council 247, National Academy of Sciences.
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., & Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3-4), 496-510.
- Dearman, W. R. (1974). The characterization of rock for civil engineering practice in Britain. *La Géologie de l'Ingénieur. Société Géologique de Belgique*, 1-75.
- Dearman, W. R. (1991). *Engineering Geological Mapping*. London: Butterworth - Heinemann.
- Deere, D. U., & Patton, F. D. (1971). Slope stability in residual soils. *Proceedings of the Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 87-170.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2015). *Portal web DNP*. Recuperado de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>

- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., & Ibsen, M. L. (Eds.). (1996). *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Chichester: Wiley & Sons.
- Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito (DPAE). (2000). Términos de referencia para estudios de riesgo por inestabilidad del terreno. *Memorias del Seminario: Estudios de Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa*. Bogotá.
- Echeverri, O., & Valencia, Y. (2004). Análisis de los deslizamiento en la cuenca de la Quebrada La Iguana de la ciudad de Medellín a partir. *Dyna*, 71(142), 33-45.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2017). *ArcGIS Desktop - ArcMap*. (ESRI, Ed.). Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>
- FAO. (2014). *Agriculture and Consumer Protection Department*. Recuperado de <http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Refer/ErosInd.htm#Sheet Erosion>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004, 33.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). (On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes) Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Engineering Geology*, 102, 85-98.
- Folk, R. L. & Ward, W. C. (1957). Brazos river bar: a study of the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Forero Dueñas, C., Gálvez, P. & Fino y Ulloa. (1999). "Estudios de la estructura de las cenizas volcánicas de Armenia y su relación con el comportamiento geotécnico". *X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Boletín Colombiano de Geotecnia*. Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotecnia.
- Gallant, J. C., & Wilson, J. P. (2000). Primary topographic attributes. In J. P. Wilson, & J. C. Gallant, *Terrain Analysis: Principles and Applications* (pp. 51-85). New York: John Wiley & Sons.
- Galván, V. R. (1999). *Simulation of the geotechnical properties of arenaceous soft rocks by means of artificial materials (in Portuguese)*. PhD Thesis. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- García Rodríguez, M. J. (2008). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. Tesis Doctoral. Alcalá: Universidad de Alcalá.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.
- Geospatial. (n.d.). *Geospatial*. Recuperado de <http://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-palsar.html>
- Glade, T., & Crozier, M. (2005). The nature of landslide hazard impact. In: *Landslide hazard and risk*. (T. Gladem, M. Andersonm, & M. Crozierm, Eds.) Chichester: John Wiley & Sons.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.
- Guidicini, G., & Iwasa, O. Y. (1977). Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 16(1), 13-20.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth Science Reviews*, 112, 42-66.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3), 239-267.
- Hansen, A. (1984). *Landslide Hazard Analysis*. (D. Brunsen, & D. B. Prior, Eds.) *Slope Instability*. New York: John Wiley and Sons.
- Havenith, H.-B., Torgoev, A., Braun, A., Schlögel, R., & Micu, M. (2016). A new classification of earthquake-induced landslide event sizes based on seismotectonic, topographic, climatic and geologic factors. *Geoenvironmental Disasters*, 3(6). doi: 10.1186/s40677-016-0041-1
- Hermelín, M. (1985). Suelos, Rocas y Formaciones Superficiales. *DYNA*, (106), 25-29.
- Hermelín, M. (1987). *Bases de Geología Ambiental*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *News Journal ISRM*, 2(2), 4-16.

- Hoek, E., Kaiser, P. & Bawden, W. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: Balkema.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., & Bardou, E. (2008). Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. In J. Locat, D. Perret, D. Turmel, & D. Demers (Ed.), *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards From Causes to Management 20 - 24 May 2008* (pp. 339-406). Quebec: Presse de l'Université Laval.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 869-885.
- Hoyos Patiño, F. (2001). *Geotecnia: Diccionario Básico*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Hoyos Patiño, F. (2003). *Suelos residuales tropicales*. Bogotá: Hombre Nuevo Editores.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Hunt, R. E. (1984). *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. New York: McGraw-Hill Company.
- Hutchinson, M. F., & Gallant, J. C. (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. In J. P. Wilson, & J. C. Gallant, *Terrain analysis: principles and applications* (pp. 29-50). New York: John Wiley & Sons.
- IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA. (2008). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC - Resumen Ejecutivo*. Bogotá.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000*. Bogotá: Scripto Ltda.
- IDEAM. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia Nivel Nacional. Escala Gruesa y fina*. Bogotá: Scripto.
- IDEAM. (2012). *Ecosistemas*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>
- IGAC & CORANTIOQUIA. (2014). *Memoria explicativa del mapa de procesos de movimientos en masa asociados a erosión*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Centro de Investigación y Desarrollo CIAF.
- IGAC & UPRA. (2015). *Leyenda de Usos Agropecuarios del Suelo a escalas mayores a la 1:25.000*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (1998). *Zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile y avenidas torrenciales en la cabecera municipal de pradera - Valle del Cauca*. Bogotá: Ingeominas, Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2001). *Evaluación del Riesgo por fenómenos de Remoción en Masa, Guía Metodológica*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2002). *Catálogo Nacional de Movimientos en Masa*. Bogotá: Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2004a). *Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica: Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica - Volumen I*. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2004b). *Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica: Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geológica para Ingeniería - Volumen II*. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2009). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa y zonificación geomecánica de la cuenca del río Combeima - Ibagué - Tolima. Escala 1:25.000*. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2013). *Análisis de Dinámicas de Cambio de las Coberturas de la Tierra en Colombia, escala 1:100.000 periodos 2000-2002 y 2005-2009*. (J. Rodríguez, & V. Peña, Eds.) Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2004). *Tipos de coordenadas manejados en Colombia. Anexo 13*. Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2005a). *Diario Oficial 45.812 Resolución 068: Datum Oficial de Colombia en el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia*. Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2005b). *Interpretación Visual de Imágenes de Sensores Remotos y su Aplicación en levantamientos de Cobertura y Uso de la Tierra*. Bogotá.
- International Association of Engineering Geology (IAEG). (1981). Rock and soil description and classification for engineering geological mapping report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 24(1), 235-274.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). (1981). *Rock characterization, testing and monitoring: ISRM Suggested Methods*. (E. T. Brown, Ed.). Oxford: Pergamon Press.
- Jaiswal, P., & van Westen, C. J. (2009). Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. *Geomorphology*, 112, 96-105.
- Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (JTC-1). (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, 85-98.
- Kanji, M. A. (2014). Critical issues in soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 186-195.
- Kappes, M. S., Malet, J. -P., Remaitre, A., Horton, P., Jaboyedoff, M., & Bell, R. (2011). Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 627-641. doi: 10.5194/nhess-11-627-2011
- Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95, 406-421.
- Lambina, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., et al. (2001). The causes of land use and land cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261-269.
- Löffler, J., Anschlag, K., Baker, B., Finch, O.-D., Diekkrüger, B., Wundram, D., et al. (2011). Mountain Ecosystem Response to Global Change. *Erdkunde*, 65(2), 189-213.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
- Marinos, P. & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proceedings of GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (Melbourne, Victoria, Australia)* (pp. 1422-1446). Lancaster: Technomic Publishers.
- Marinos, P. & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, 82-92.
- Marinos, P., Hoek, E. & Marinos, V. (2006). Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 129-142.
- Marinos, P., Marinos, V. & Hoek, E. (2007). Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. In C. Olalla, Á. Perucho, & M. Romana (Ed.), *Proceedings of the ISRM Workshop W1, Madrid, Spain, 6-7 July 2007* (pp. 13-21). Madrid: Taylor & Francis.
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 55-65. doi: 10.1007/s10064-004-0270-5
- Mavrouli, O., Abbruzzese, J., Corominas, J., & Labiouse, V. (2014). Review and advances in methodologies for rockfall hazard and risk assessment. In T. van Asch, J. Corominas, S. Greiving, J.-P. Malet, & S. Sterlacchini, *Mountain risks: from prediction to management and governance* (vol. 34, pp. 179-199). Dordrecht: Springer.
- McCalpin, J. P. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. *Proceedings of the 21st Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, (pp. 99 - 111). Moscow: University of Idaho.
- Meijerink, A. M. (1988). Data acquisition and data capture through terrain mapping unit. *ITC Journal*, 1, 23-44.
- Michoud, C., Derron, M. H., Horton, P., Jaboyedoff, M., Baillifard, F. -J., Loye, A., et al. (2012). Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Natural*

- Hazards and Earth System Sciences*, 12, 615-629. doi: 10.5194/nhess-12-615-2012
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2014). Decreto 1807 de 2014. *Diario Oficial No. 49.279*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Guía Técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá: Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto No. 3600 de 2007. *Diario Oficial No. 46.757*.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (1998). Decreto 879 de 1998. *Diario Oficial No. 43.300*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Informe Final: Metodología para la Evaluación del Riesgo en los POMCAS*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2015). Decreto 1077 de 2015. *Diario Oficial No. 49.523*.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería* (Segunda ed.). México: Alfaomega Grupo Editor.
- Montes, N., & Sandoval, A. (2001). *Base de datos de fallas activas de Colombia*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intranual y diaria. *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia*, (5), 59-69.
- Mugagga F., K. V. (2011). A characterization of the physical properties of soil and the implications for landslide occurrence on the slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. *Natural Hazards*, 60(3), 1113-1131. doi: 10.1007/s11069-011-9896-3
- Murcia, H. F., Borrero, C. A., Pardo, N., Alvarado, G. E., Arnosio, M., & Scolamacchia, T. (2013). Depósitos volcánoclasticos: términos y conceptos para una clasificación en español. *Revista Geológica de América Central*, 48, 15-39.
- Naranjo Henao, J. L. (2015). *Fotogeología práctica. Fotogeología descriptiva e interpretativa con ejemplos en Colombia* (Primera ed.). Manizales: Universidad de Caldas.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2017). *Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology*. Recuperado de <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- New Zealand Geotechnical Society Inc (NZGS). (2005). *Field Description of Soil and Rock: guideline for the field Classification and description of soil and rock for engineering purposes*. (D. Burns, G. Farquhar, M. Mills, & A. Williams, Edits.). Wellington: NZGS.
- Ojeda, J. (1996). *Elementos conceptuales de las metodologías de zonificación geotécnica y de amenazas para propósitos de planificación territorial*. Bucaramanga: VI Congreso Colombiano de Geotecnia y Erosión.
- Olaya Rodríguez, M. H., & Rojas, S. (2014). Integración de diferentes herramientas para el análisis integral de cambios de coberturas naturales de la tierra. *Memorias del XVI Simposio Internacional de Selper 2014. La Geoinformación al servicio de la Sociedad*, (p. 24). Recuperado de <http://selper.org.co/papers-XVI-Simposio/Conceptos-de-la-Ciencia-IG/TC3-Integracion-de-diferentes-herramientas-para-el-analisis-integral-de-cambios.pdf>
- Olaya, V. (2009). Basic land-surface parameters. In T. Hengl, & H. I. Reuter, *Geomorphometry: concepts, software, applications - Developments in Soil Science Series* (vol. 33, pp. 141-169). Amsterdam: Elsevier.
- Organización para las Naciones Unidas (ONU). (2009). *Guía para la Descripción de Suelos (Traducido y adaptado por Ronald Vargas Rojas)*. Roma: ONU.
- Ortiz, D. P., Penagos, J. C., & Lizcano, A. (1992). *Determinación de lluvias críticas que activan deslizamientos empleando redes neuronales*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide Hazard Assessment: recent Trends and Techniques. *SpringerPlus*, 2(1), 523.
- Peña, J. L. (1997). *Cartografía geomorfológica: básica y aplicada* (Primera ed.). Logroño: Geoforma Ediciones.
- Pérez Miranda, R., Cruz Bello, G. M., Moreno Sánchez, F., González Hernández, A., & Romero Sánchez, E. M. (2012). Cambios de vegetación y uso de suelo en la Cuenca Río Bravo-San Juan, Coahuila (1993-2008). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 25-40.
- Popescu, M. (2002). Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. *Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures*, (pp. 61-81). Singapore.

- Portilla Gamboa, M. E. (2014). *Reconstrucción y análisis de ocurrencias regionales de múltiples eventos de movimientos en masa generados por lluvias históricas en los pirineos*. Tesis de doctorado. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/95519>
- Portilla, M., Chevalier, G., & Hürlimann, M. (2010). Description and analysis of the debris flows occurred during 2008 in the Eastern Pyrenees. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 10, 1635-1645. doi: 10.5194/nhess-10-1635-2010
- Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA). (2007, Noviembre). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas. (Servicio Nacional de Geología y Minería, Ed.) *Publicación Geológica Multinacional*, (4), 432.
- Reichenbach P., C. B. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environmental Management*, 54(6), 1372-1384. doi: 10.1007/s00267-014-0357-0
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A. C., & Rossi, M. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environmental Management*, 54, 1372-1384. doi: 10.1007/s00267-014-0357-0
- Remondo, J., Soto, J., González-Diez, A., Díaz de Terán, J. R., & Cendrero, A. (2005). Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas in northern Spain. *Geomorphology*, 66(1-4), 69-84. doi: 10.1016/j.geomorph.2004.09.009
- Rodríguez, C. E. (2007). Earthquake-induced landslides in Colombia. *International Symposium on Landslide Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*. Tokyo. Sin publicar.
- Rodríguez, C. E., Bommer, J. J., & Chandler, R. J. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(5), 325-346.
- Rodríguez, E., Morris, S., & Belz, J. E. (2006). A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249-260.
- SAFELAND. (2010-2012). *Living with Landslide risk in Europe: Assesment, effects of global change and risk management strategies. Large scale collaborative research project. The seventh framework programme for research and technological development (FP7) of the European Commissi.*
- Salitchev, K. A. (1979). *Cartografía*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Sánchez Cuervo, A. M. (2014). *Spatial dynamics and drivers of land use and land cover change in Colombia: implications for biodiversity conservation*. Ph. D. Thesis, University of Puerto Rico. Recuperado de [http://repositorio.upr.edu:8080/jspui/bitstream/10586%20/450/1/PhD\\_Dissertation\\_AnaMariaSanchezCuervo%20S.pdf](http://repositorio.upr.edu:8080/jspui/bitstream/10586%20/450/1/PhD_Dissertation_AnaMariaSanchezCuervo%20S.pdf)
- Santacana, Q. N. (2001). *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat (Barcelona)*. Tesis doctoral. UPC.
- Santana, G., & Pineda, N. B. (2011). *Descripción del cambio de uso y cobertura del suelo en los bosques primarios del estado de México, durante 1976-2000*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Processes* (Segunda ed.). Oxford: Oxford University Press.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) & Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2015a). *Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Escala Detallada. Colección de Guías y Manuales*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2013). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de Cáqueza - Cundinamarca*. Bogotá: Dirección de Geoamenazas - Grupo de Movimientos en Masa, SGC.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2015b). *Zonificación Geomecánica y de Amenaza por Movimientos en Masa del Municipio de Popayán - Cauca*. Popayán: Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas - Grupo de Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2015c). *Estándares para la presentación y almacenamiento de productos de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa para planchas a escala 1:100.000. Versión 1*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas - Grupo de Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa.

- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2015d). *Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa, Escala 1:100.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas - Grupo de Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa. Recuperado de [http://ftp\\_univ.sgc.gov.co/bodega-simma/docsreferencia/DocumentoMetod100k\\_V4\\_Preliminar\\_Septiembre\\_01\\_2016\(1\).pdf](http://ftp_univ.sgc.gov.co/bodega-simma/docsreferencia/DocumentoMetod100k_V4_Preliminar_Septiembre_01_2016(1).pdf)
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017a). *Las Amenazas por Movimientos en Masa en Colombia: Una visión a escala 1:100.000* (Primera ed.). Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017b). Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa de las subcuencas de las Quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco del municipio de Mocoa - Putumayo, escala 1:25.000. Bogotá: Dirección de Geoamenazas.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (n.d.). *SIMMA - Sistema de Información de Movimientos en Masa*. Recuperado de <http://simma.sgc.gov.co/#/>
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a la Zonificación de Amenazas por Movimientos en Masa, Escala 1:100.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental.
- Sidle, R. C., & Ochiai, H. (2006). *Landslides: Processes, Prediction and Land Use*. Washington: American Geophysical Union.
- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. N. (1969). "Stability of natural slopes and embankment foundations. *Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 4*, pp. 291-340. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Suárez Niño, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Süzen, M., & Doyuran, V. (2004). Data driven Bivariate Landslide Susceptibility Assesment using Geographical Information Systems: a Method and Application to Asarsuyu. *Engineering Geology*, 71, 303-321.
- Tanyas, H., van Westen, C. J., Allstadt, K. E., Nowicki Jesse, M. A., Görüm, T., Jibson, R. W., et al. (2017). Presentation and Analysis of a Worldwide Database of Earthquake-Induced Landslide Inventories. *Journal of Geophysical Research*, in press. doi: 10.1002/2017JF004236
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson - Prentice Hall.
- Turner, A. K., & Schuster, R. L. (1996). *Landslides - Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. Washington: National Research Council.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. Ginebra: Naciones Unidas.
- United States. Bureau of Reclamation. (2001). *Engineering geology field manual. Second Edition* (Vol. II). Washington: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2009). *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas Torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Universidad Nacional de San Juan. (2016). *Nociones sobre teledetección*. Apuntes de Cátedra. Cartografía Aplicada y SIG. Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Recuperado de <http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/cartografiaaplicadaminas/wp-content/uploads/2016/10/Apuntes-de-c%C3%A1tedra-para-Cartograf%C3%A1Da-Aplicada.pdf>
- van Westen, C. (2013). *Guidelines for the generation of 1:50.000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Nghe An*. University of Twente.
- van Westen, C. J. (1993). *Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation*. ITC Publication No. 15, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede.
- van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3-4), 112-131.
- van Westen, C. J., Kappes, M. S., Quan Luna, B., Frigerio, S., Glade, T., & Malet, J.-P. (2014). Medium-Scale Multi-hazard Risk Assessment of Gra-

- vitational Processes. In T. Van Asch, J. Corominas, S. Greiving, J.-P. Malet, & S. Sterlacchini, *Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance* (vol. 34, pp. 201-231). Dordrecht: Springer.
- van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003, Noviembre). Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*, 30(3), 339-419.
- van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial Photointerpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*. The Hague: Smiths Publishers.
- Vargas Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. *Boletín de Geología*, 22(37), 39-55.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. (R. L. Schuster, & R. J. Krizek, Eds.) *Special Report 176: Landslides: Analysis and control*, 11-33.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Paris: UNESCO.
- Vega, J. A., & Hidalgo, C. A. (2016). Quantitative risk assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings. *Geomorphology*, 273, 217-235. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.07.032
- Verstappen, H. T., & van Zuidam, R. A. (1992). *The ITC System of Geomorphological Survey. ITC Publication Number 10*. Enschede.
- Villota, H. (1997). Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno. *Revista CIAF*, 15(1), 83-115.
- Wadell, H. A. (1933). Sphericity and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, 41, 310-331.
- Weltman, A. J. & Head, J. M. (1983). *Site investigation manual*. Construction Industry Research and Information Association. Great Britain, Directorate of Civil Engineering Services. London: CIRIA.
- Wieczorek, G. F. (1996). Landslide triggering mechanisms. (K. Turner, & R. Schuster, Eds.) *Landslides Investigation and Mitigation - Special Report N° 247. Transportation Research Board - National Research Council*, 76-90.
- Yamín, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilística para la gestión del riesgo de desastres: el caso de Bogotá, Colombia*. Bogotá: Banco Mundial y Universidad de los Andes.
- Zieher, T., Perzl, F., Rössel, M., Rutzinger, M., Meißl, G., Markart, G., et al. (2016). A multi-annual landslide inventory for the assessment of shallow landslide susceptibility – Two test cases in Vorarlberg, Austria. *Geomorphology*, 259, 40-54.
- Zinck, J. A. (2012). *Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. (ITC, Ed.) Enschede: ITC Special Lecture Notes Series.

# ÍNDICES

## TABLAS

---

Tabla 2.1. Relación entre clases de escalas, niveles de estudio y características de interés para zonificación de amenaza por movimientos en masa	30
Tabla 3.1. Lista de factores causales de movimientos en masa	39
Tabla 3.2. Representación esquemática de los principales datos de caracterización geoambiental para zonificación de amenaza por movimientos en masa a media	40
Tabla 3.3. Factores y temáticas para la caracterización geoambiental del área de estudio y zonificación de amenaza por movimientos en masa propuestos en esta metodología	41
Tabla 3.4. Atributos mínimos que debe contener el inventario de movimientos en masa	45
Tabla 3.5. Información secundaria que se puede recopilar de diferentes entidades públicas y privadas	47
Tabla 3.6. Representación cartográfica y simbología de algunos atributos para los diferentes tipos de movimientos en masa	51
Tabla 3.7. Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa	61
Tabla 3.8. Unidades / subunidades indicativas de procesos tipo caída	63
Tabla 3.9. Unidades/subunidades indicativas de flujos clasificados como avenidas torrenciales	64
Tabla 3.10. Geoformas indicativas de zonas de aporte de sedimentos para procesos tipo flujo clasificados como avenida torrencial	65
Tabla 3.11. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen	68
Tabla 3.12. Influencia relativa de la vegetación natural y seminatural en la estabilidad de los taludes	73
Tabla 3.13. Resoluciones de diferentes Satélites y sensores remotos con imágenes disponibles en Colombia	77
Tabla 3.14. Leyenda Tercer nivel Corine Land Cover	79
Tabla 3.15. Leyenda para análisis de la Susceptibilidad por Movimientos en masa	81
Tabla 3.16. Leyenda de usos del suelo	82
Tabla 3.17. Clase de cambio por deforestación y priorización de las zonas para análisis multitemporal en la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25.000	84
Tabla 3.18. Matriz de cambios con las unidades de cobertura de la tierra utilizadas en zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000.	85
Tabla 3.19. Atributos del análisis multitemporal	86
Tabla 4.1. Métodos de análisis propuesto para cada tipo de movimiento en masa	94
Tabla 4.2. Relación deslizamientos $L$ y factor condicionante $w$	97
Figura 4.2. Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante	98
Tabla 4.3. Pesos finales para la variable pendiente aplicando el método WofE en el estudio de <i>Zonificación de la Amenaza por movimientos en masa, municipio de Popayán, departamento del Cauca</i>	99
Tabla 4.4. Categorización de la susceptibilidad por zonas de inicio de movimientos en masa tipo caída	105

Tabla 4.5. Categorización de la susceptibilidad por zonas de depósito de movimientos tipo caída	105
Tabla 4.6. Matriz para la categorización de la susceptibilidad por movimientos tipo caída	105
Tabla 4.7. Categorías de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo	107
Tabla 4.8. Matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes tipos de movimiento en masa	108
Tabla 4.9. Contenido de la leyenda del mapa de susceptibilidad	110
Tabla 5.1. Categorías de amenaza a partir de las categorías de susceptibilidad	116
Tabla 5.2. Esquema base para la elaboración de la leyenda del mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa	128
Tabla 5.3. Ejemplo de leyenda para la categoría de amenaza alta por movimientos en masa tipo deslizamiento del municipio de Mocoa, Putumayo	129
<b>Anexos</b>	
Tabla 1. Características de movimientos en masa en la interpretación de imágenes y en el levantamiento de campo	140
Tabla 3. Terminología de clasificaciones previas de la edad relativa	145
Tabla 4. Relación entre edad relativa y estado de la actividad de un movimiento en masa	145
Tabla 5. Atributos del inventario para movimientos en masa cartografiados como polígono	146
Tabla 1. Clasificación de las rocas para usos geotécnicos	153
Tabla 2. Clasificación del tamaño de grano en las rocas	154
Tabla 3. Términos usados en la descripción de la forma de los granos (partículas)	154
Tabla 4. Esquema descriptivo de los grados de meteorización de la matriz rocosa	155
Tabla 5. Índices de campo para determinar la resistencia a la compresión simple, de suelos cohesivos y rocas a partir de índices de campo	155
Tabla 6. Clasificación de las rocas en general según su textura/estructura	156
Tabla 7. Los términos para la descripción del laminado y espesor de las capas en rocas sedimentarias y depósitos volcánoclasticos	156
Tabla 8. Rangos de clasificación de macizo según el GSI	158
Tabla 9. Comparación de Perfiles de Meteorización de un macizo rocoso según Deere y Patton (1971), Dearman (1974, 1991) y Forero et al. (1999)	163
Tabla 10. Descripción y comportamiento del perfil de meteorización	164
Tabla 11. Clasificación genética de las unidades de suelo	167
Tabla 12. Terminología para describir la humedad natural o condición de humedad en el campo	168
Tabla 13. Terminología para la descripción de discontinuidades en masas de suelo	168
Tabla 14. Texturas de los suelos según el tamaño de las partículas (ASTM D2487-00: <i>Standard Classification of Soils for Engineering Purposes - Unified Soil Classification System</i> )	169
Tabla 15. Resumen de la descripción morfológica (forma, redondez y tipo superficie) de los clastos o granos que conforman un suelo (depósito)	169
Tabla 16. Criterios para describir la compacidad	172
Tabla 17. Terminología para describir la densidad relativa de los suelos arenosos	172
Tabla 18. Comparación entre el grado de selección de fragmentos en un depósito, considerando los criterios sedimentológicos tradicionales (Folk & Ward, 1957) con los volcánicos propuestos por Cas & Wright (1987)	173
Tabla 19. Terminología utilizada para describir la consistencia de un suelo arcilloso	174
Tabla 20. Criterios para describir la plasticidad	174
Tabla 1. Planilla de verificación de coberturas y uso del suelo	179
Tabla 2. Relación entre las unidades de Coberturas de la Tierra y las unidades de Uso del Suelo actual	180

## FIGURAS

Figura 1.1. Marco de referencia para el análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000	19
Figura 2.1. Cubrimiento geográfico del DEM SRTM1	32
Figura 3.1. Ejemplos de algunas imágenes de sensores remotos del casco urbano de Mocoa, Putumayo	48
Figura 3.2. Partes de los movimientos en masa tipo deslizamiento: escarpe o zona de inicio (e), cuerpo o zona de depósito (d) y área proclive a ser afectada (ace)	49
Figura 3.3. a) Partes de los movimientos en masa tipo flujo: escarpe (e) y cuerpo (d); b) Partes de un flujo clasificado como avenida torrencial: zona de tránsito (t) y zona de depósito (d)	49
Figura 3.4. Ejemplo de aplicación de la propuesta de representación cartográfica y simbología para el mapa de inventario de procesos morfodinámicos	53
Figura 3.5. Simbología para la representación de rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad	54
Figura 3.6. Ejemplo de representación cartográfica tipo punto para los movimientos en masa y su estado de la actividad	54
Figura 3.7. Ejemplo de la diferenciación de las partes de movimientos en masa tipo flujo	56
Figura 3.8. Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente	62
Figura 3.9. Clasificación de rocas de acuerdo con su resistencia	67
Figura 3.10. Flujograma de actividades en la generación del mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	69
Figura 3.11. Metodología para la generación de la variable cobertura de la tierra y uso del suelo, utilizada para el proceso de zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000.	74
Figura 3.12. Definición del periodo de análisis multitemporal	76
Figura 3.13. Esquema para la generación de la capa de cambio de cobertura utilizado en zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000	78
Figura 4.1. Esquema metodológico para el análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa	94
Figura 4.3. Modelo conceptual para el cálculo de la capa de susceptibilidad por deslizamientos	101
Figura 4.4. Ejemplo de una curva de éxito	102
Figura 4.5. Ejemplo de curva de éxito	102
Figura 4.6. Ejemplo de representación cartográfica del mapa de susceptibilidad final	109
Figura 5.1. Metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia	119
Figura 5.2. Funciones que representan los umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa en un área específica de análisis	120
Figura 5.3. Máxima distancia epicentral para movimientos en masa no coherentes	122
Figura 5.4. Máxima distancia epicentral para movimientos en masa coherentes	122
Figura 5.5. Áreas afectadas por movimientos en masa durante sismos	123
Figura 5.6. Ejemplo de visualización del mapa de amenaza por movimientos en masa con sus atributos representados	127
<b>Anexos</b>	
Figura 2. Factor GSI para macizos rocosos homogéneos	158
Figura 3. Esquema general para estimar el valor del GSI, para macizos rocosos heterogéneos como <i>Flysch</i>	159

Figura 4. Tabla GSI para molasas confinadas aplicado principalmente en tunelería	161
Figura 5. Rangos de GSI para complejos ofiolíticos de peridotitas y serpentinas	162
Figura 6. Perfil de meteorización de Dearman (1995)	165
Figura 8. Carta de comparación visual de la redondez y esfericidad de los clastos o granos	170
Figura 9. Morfología de los granos (partículas)	170
Figura 10. Tipos de gradación	171
Figura 11. Tipos de empaquetamiento o estructuras de soporte en depósitos	171
Figura 12. Tabla de comparación visual para la clasificación de la selección (sorteamiento) de las partículas	173

## FORMATOS

Formato 1. Caracterización de unidades de roca (macizo rocoso)	175
Formato 2. Caracterización de unidades de suelo (Página 1).	176
Formato 2. Caracterización de unidades de suelo (Página 2).	177

## FOTOGRAFÍAS

1. Panorámica Páramo del Almorzadero, municipio de Concepción, departamento de Santander. Fotografía: Jorge Leonardo Chaparro Cordón	12
2. Panorámica municipio de Rovira, departamento de Tolima. Fotografía: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	14-15
3. Zona rural del municipio de Chachagüí, departamento de Nariño. Fotografía: Karol Constanza Ramírez Hernández	16
4. Movimientos en masa superficiales en las veredas La Reforma y Alto Oriente, municipio de Tello, departamento de Huila. Fotografía: Jorge Leonardo Chaparro Cordón.	23
5. Valle del río El Carmen, corregimiento Guamalito del municipio El Carmen, Norte de Santander. Fotografía: Antonio Andrés Reyes Merchán	26-27
6. Vereda limite entre Corral Falso y Boyacá, municipio Cerrito, departamento de Santander. Fotografía: Joaquín Andrés Valencia Ortiz	28
7. Microcuenca de la quebrada Chorreritos, vereda Ramírez, municipio de Cáchira, departamento de Norte de Santander. Fotografía: Jorge Arturo Castro Guerra	34-35
8. Sierra Nevada del Cocuy, municipio de Guicán, departamento de Boyacá. Fotografía: Jesús Leonardo Rincón Jaimes	36
9. Zona rural del municipio de Cajamarca, departamento de Tolima. Fotografía: Karol Constanza Ramírez Hernández	50
10. Municipio de Yacuanquer, departamento de Nariño. Fotografía: Karol Constanza Ramírez Hernández	52
11. Cono de deyección sobre la margen izquierda del río Chicamocho, municipio de Aratoca, departamento de Santander. Fotografía: Jorge Leonardo Chaparro Cordón	60
12. Zona rural del municipio de Cajamarca, departamento de Tolima. Fotografía: Karol Constanza Ramírez Hernández	88
13. Movimientos en masa superficiales en el sector Guamalito, municipio El Carmen, Norte de Santander. Fotografía: Antonio Andrés Reyes Merchán	90-91
14. Deslizamiento traslacional y flujos de detritos, vereda El Carmen, municipio de Onzaga, departamento de Santander. Fotografía: Jorge Leonardo Chaparro Cordón	92

15. Movimiento en masa sobre la margen izquierda del río Ceibas, vereda Los Cauchos, municipio de Tello, departamento de Huila. Fotografía: Leonardo Palmera Sánchez	103
16. Vereda La Meseta, municipio de Popayán, departamento del Cauca. Fotografía: Enif Medina Bello	112-113
17. Parte alta cuenca de la quebrada Taruca, municipio de Mocoa, departamento de Putumayo. Fotografía: Jorge Arturo Castro Guerra	114
18. Margen izquierda del río Cravo Sur, municipio de Yopal, departamento de Casanare. Fotografía: Cap. Harbey Ramírez Ávila - Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Yopal	124
19. Panorámica sector La Laguna, límite entre los municipios de Silos y Mutiscua, departamento de Norte de Santander. Fotografía: Jorge Leonardo Chaparro Córdon	130-131
20. Procesos de erosión en la vereda Cucharito, municipio de Tello, departamento de Huila. Fotografía: Isabel Cristina Ardila Parra	132
21. Depósito coluvial que suprayace depósitos volcánico-lásticos del volcán Cerro Machín, municipio de Cajamarca, departamento del Tolima. Fotografía: Gustavo Adolfo Trejos González	152
22. Depósitos volcánico-lásticos del volcán Nevado del Ruiz cubriendo el Batolito de Sonsón, municipio de Sonsón, departamento de Antioquia. Fotografía: Gustavo Adolfo Trejos González	154
23. Veredas Santa Helena (municipio de Enciso) y Tenerife (municipio de Concepción), departamento de Santander. Fotografía: Oscar Enrique Forero Ospino	157
24. Panorámica del río Cauca, municipio de Anzá, departamento de Antioquia. Fotografía: Gustavo Adolfo Trejos González	160

## MAPAS

1. Mapa de inventario de procesos morfodinámicos	189
2. Mapa de subunidades geomorfológicas	191
3. Mapa de unidades geológicas superficiales	193
4. Mapa de cobertura de la tierra	195
5. Mapa de usos del suelo	197
6. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa	199
7. Mapa de amenaza por movimientos en masa	201

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), entidad del Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación y como parte del Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo, ha elaborado la *Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*, como aporte a los procesos de conocimiento del territorio y apoyo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial rural de los municipios. Esta propuesta fue elaborada con base en premisas de calidad y gradualidad en el conocimiento, viabilidad técnica y aplicabilidad, además, presenta aspectos claves para el análisis y evaluación de amenaza por movimientos en masa a partir del levantamiento de información temática como el inventario de procesos morfodinámicos, información geológica, geomorfológica, de cobertura de la tierra y uso del suelo, hidrológica y sísmica.

La metodología propuesta es resultado de la documentación de diferentes proyectos desarrollados en el SGC, en diferentes ambientes y escalas en el territorio nacional, en los cuales se han validado algunos de los procedimientos propuestos. Igualmente, los conceptos, los métodos y las técnicas presentadas en esta guía se basan en trabajos de amplia consulta, cuya revisión es abordada desde el punto de vista técnico-práctico. Además, durante el proceso de construcción del documento se desarrollaron talleres técnicos en los que se contó con la participación de expertos internacionales y nacionales de diferentes instituciones y entidades públicas y privadas del orden nacional, regional y local; cuya discusión y aportes fueron incorporados y hacen parte fundamental en el enfoque metodológico presentado.

Entre los posibles usuarios de la guía se encuentran todos aquellos profesionales encargados de la elaboración, supervisión y administración de estudios de amenaza por movimientos en masa, planificadores y tomadores de decisiones en el ámbito de la administración pública. También, la guía sirve como referencia para investigadores y académicos cuya labor se relacione con la gestión del riesgo por movimientos en masa y planificación del territorio.

