

Guía metodológica

para zonificación de amenaza
por avenidas torrenciales



Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales

Autores

Alfonso Mariano Ramos Cañón
Antonio Andrés Reyes Merchán
Maddy Alejandra Munévar Peña
Gloria Lucía Ruiz Peña
Silvia Viviana Machuca Castellanos
Michael Steve Rangel Flórez
Luis Felipe Prada Sarmiento
Miguel Ángel Cabrera
Carlos Eduardo Rodríguez Pineda
Nicolás Escobar Castañeda
Carlos Alberto Quintero Ortiz
Jorge Alberto Escobar Vargas
Juan Diego Giraldo Osorio
Maudi Sorley Medina Orjuela
Leandro Durán Santana
David Enrique Trujillo Osorio
Diego Fernando Medina Ávila
Carlos Andrés Capachero Martínez
Danny León Delgado
Karol Constanza Ramírez Hernández
Edna Esperanza González Rojas
Sara Lucía Rincón Chisino
Paula Angélica Solarte Blandón
Lady Carolina Castro Malaver
Carolina López Marín
Sofía del Rosario Navarro Alarcón
Michael Alejandro Pérez Moreno

© SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Oscar Paredes Zapata
DIRECTOR GENERAL

Marta Lucía Calvache
DIRECTORA TÉCNICA DE GEOAMENAZAS

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

ISBN impreso: 978-958-53131-4-9
ISBN digital: 978-958-53131-5-6
DOI: <https://doi.org/10.32685/9789585313156>



© Servicio Geológico Colombiano (2021).
Esta obra es distribuida bajo licencia
internacional Creative Commons
Atribución/Reconocimiento 4.0

CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO –
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

DIRECCIÓN TÉCNICA

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
Antonio Andrés Reyes Merchán
Gloria Lucía Ruiz Peña
Supervisores del convenio

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
Alfonso Mariano Ramos Cañón
Director técnico
Maddy Alejandra Munévar Peña
Coordinadora técnica

AUTORES

Alfonso Mariano Ramos Cañón
Pontificia Universidad Javeriana
Antonio Andrés Reyes Merchán
Servicio Geológico Colombiano
Maddy Alejandra Munévar Peña
Pontificia Universidad Javeriana
Gloria Lucía Ruiz Peña
Servicio Geológico Colombiano
Silvia Viviana Machuca Castellanos
Pontificia Universidad Javeriana
Michael Steve Rangel Flórez
Servicio Geológico Colombiano
Luis Felipe Prada Sarmiento
Pontificia Universidad Javeriana
Miguel Ángel Cabrera
Universidad de los Andes
Carlos Eduardo Rodríguez Pineda
Pontificia Universidad Javeriana
Nicolás Escobar Castañeda
Pontificia Universidad Javeriana
Carlos Alberto Quintero Ortiz
Servicio Geológico Colombiano
Jorge Alberto Escobar Vargas
Pontificia Universidad Javeriana
Juan Diego Giraldo Osorio
Pontificia Universidad Javeriana
Maudi Sorley Medina Orjuela
Servicio Geológico Colombiano
Leandro Durán Santana
Pontificia Universidad Javeriana
David Enrique Trujillo Osorio
Pontificia Universidad Javeriana
Diego Fernando Medina Ávila
Servicio Geológico Colombiano
Carlos Andrés Capachero Martínez
Pontificia Universidad Javeriana
Danny León Delgado
Servicio Geológico Colombiano
Karol Constanza Ramírez Hernández
Servicio Geológico Colombiano
Edna Esperanza González Rojas
Servicio Geológico Colombiano
Sara Lucía Rincón Chisino
Pontificia Universidad Javeriana
Paula Angélica Solarte Blandón
Pontificia Universidad Javeriana
Lady Carolina Castro Malaver
Pontificia Universidad Javeriana
Carolina López Marín
Servicio Geológico Colombiano
Sofía del Rosario Navarro Alarcón
Servicio Geológico Colombiano
Michael Alejandro Pérez Moreno
Servicio Geológico Colombiano

COMITÉ EDITORIAL

PRESIDENTE

Juan Guillermo Ramírez

INTEGRANTES

Mario Andrés Cuéllar
Gloria Prieto Rincón
Marta Calvache Velasco
Hernán Olaya Dávila
Humberto Andrés Fuenzalida
Hernando Camargo
Victoria Eugenia Díaz
Virgilio Amaris
Viviana Dionicio
Teresa Duque
Julían Escallón
Armando Espinosa
Constanza Martínez

Diagonal 53 n.º 34-53
Bogotá D. C., Colombia
Teléfono: (601)2200200, ext.: 3048
ceditorial@sgc.gov.co

Fernando Carretero
CORRECCIÓN DE ESTILO

Leonardo Cuéllar
DIAGRAMACIÓN

Diana Abadía
DISEÑO DE CUBIERTA

Carolina Hernández
EDITORIA GENERAL

FOTOGRAFÍA DE CUBIERTA:

Avenida torrencial río La Paila, Corinto,
Cauca, 2017. Fotografía de Andrés Reyes

FOTOGRAFÍA DE CONTRACUBIERTA:

Río Guatiquía, Villavicencio, Meta.
Fotografía de Andrés Reyes

Las figuras, tablas o fotografías no
atribuidas a fuentes externas son de los
autores

GUÍAS TÉCNICAS Y MÉTODOS DE TRABAJO
EN GEOCIENCIAS Y ASUNTOS NUCLEARES
Bogotá, Colombia
Octubre de 2021

Citación: Ramos, A. M., Reyes, A. A.,
Munévar, M. A., Ruiz, G. L., Machuca, S.
V., Rangel, M. S., Prada, L. F., Cabrera,
M. Á., Rodríguez, C. E., Escobar, N.,
Quintero, C. A., Escobar, J. A., Giraldo, J.
D., Medina, M. S., Durán, L., Trujillo, D.
E., Medina, D. F., Capachero, C. A., León,
D., Ramírez, K. C., ... Pérez, M. A. (2021).
*Guía metodológica para zonificación de
amenaza por avenidas torrenciales*. Servicio
Geológico Colombiano y Pontificia
Universidad Javeriana. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>

Contenido

Presentación	7
Agradecimientos	9
Introducción	11

15

1. Generalidades	
1.1. Marco conceptual	18
1.1.1. Caracterización de avenidas torrenciales	21
1.1.2. Análisis de detonantes	21
1.1.3. Caracterización de la amenaza a escala 1:25 000	21
1.1.4. Caracterización de la amenaza a escala 1:2000	22
1.1.5. Otros escenarios	23
1.2. Glosario	23
1.3. Alcance	27

29

2. Área de estudio, información, cartografía básica y modelo digital de terreno (MDT)	
2.1. Escala de trabajo	31
2.2. Área de estudio para la evaluación a escala 1:25 000	31
2.2.1. Cuenca de análisis	32
2.2.2. Cuenca o zona contribuyente	34
2.3. Área de estudio para la evaluación a escala 1:2000	34
2.4. Cartografía base	34
2.5. Sistema de referencia	36
2.6. Modelo digital de terreno (MDT)	36
2.6.1. Generalidades y objetivos de la propuesta de revisión y eventual ajuste de los MDT	38
2.7. Insumos requeridos de la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25 000	43

45

3. Caracterización de avenidas torrenciales	
3.1. Fuentes de información e insumos para la caracterización de avenidas torrenciales	47
3.1.1. Información secundaria de entidades públicas y medios de comunicación	47
3.1.2. Fotografías aéreas y sensores remotos	49
3.1.3. Productos de la <i>Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000</i> utilizados en la caracterización de avenidas torrenciales	49
3.2. Procedimiento para la caracterización de avenidas torrenciales	50
3.2.1. Recopilación y análisis de información secundaria	50
3.2.2. Caracterización de avenidas torrenciales en campo	63
3.2.3. Integración de los resultados de la caracterización de avenidas torrenciales	69
3.3. Productos de la caracterización de avenidas torrenciales	69
3.3.1. Inventario de avenidas torrenciales históricas	70
3.3.2. Caracterización de avenidas torrenciales	70
3.3.3. Geomorfología indicativa de aporte y depósito	70
3.3.4. Zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales a partir de la geomorfología	70
3.3.5. Descargas y velocidades a partir de las evidencias de avenidas torrenciales recientes	70
3.3.6. Inventario de movimientos en masa y análisis multitemporal y procesos de erosión a lo largo de la zona de tránsito	70
3.3.7. Puntos de interés	71
3.3.8. Volúmenes por unidad de modelación	71

	73		
4. Análisis de detonantes			
4.1. Unidades de modelación hidrológica, geotécnica, fluidodinámica	75	5.3.1. Fuentes de información e insumos para la cuantificación de amenaza a escala 1:25 000	120
4.2. Eventos extremos y cambio climático	76	5.3.2. Procedimiento para la cuantificación de amenaza a escala 1:25 000	123
4.3. Información de la precipitación	77	5.3.3. Productos de la cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000	125
4.3.1. Curvas intensidad/duración/frecuencia (IDF) elaboradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)	78	5.4. Integración de zonificación de la susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales y zonificación de amenaza a escala 1:25 000	126
4.3.2. Precipitación diaria de estaciones	78	5.4.1. Fuentes de información e insumos para la integración de resultados	126
4.3.3. Precipitación satelital CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)	80	5.4.2. Procedimiento para la integración	126
4.4. Análisis del detonante lluvia	81	5.4.3. Productos de la integración	128
4.4.1. Definición de escenarios (periodos de retorno)	81	5.4.4. Interpretación de la zonificación final 1:25 000	129
4.4.2. Construcción de curvas de intensidad/duración/frecuencia (IDF)	82		
4.4.3. Hietograma de diseño para cada periodo de retorno	82		
4.4.4. Modelo hidrológico	83		
4.5. Productos del detonante lluvia	89		
4.5.1. Series de caudal para cada periodo de retorno	89		
	91		
5. Caracterización de la amenaza a escala 1:25 000			
5.1. Estimación de volúmenes de sólidos 1:25 000	93		
5.1.1. Fuentes de información e insumos para el cálculo del volumen de sólidos que se incorpora al flujo	93		
5.1.2. Procedimiento para la estimación de sólidos	94		
5.1.3. Productos de la estimación del volumen de material sólido que se incorpora al flujo	106		
5.2. Modelación fluidodinámica a escala 1:25 000	108		
5.2.1. Fuentes de información e insumos para la modelación fluidodinámica a escala 1:25 000	109		
5.2.2. Modelos fluidodinámicos para escala 1:25 000	113		
5.2.3. Productos de la modelación fluidodinámica a escala 1:25 000	119		
5.3. Cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000	120		
			133
		6. Caracterización de la amenaza a escala 1:2000	
		6.1. Estimación de volúmenes de sólidos a escala 1:2000	135
		6.1.1. Procedimiento para la estimación de los sólidos provenientes de inestabilidades en los taludes debidas a socavación lateral del cauce	135
		6.1.2. Sólidos provenientes de inestabilidades causadas por socavación lateral del cauce	142
		6.2. Modelación fluidodinámica a escala 1:2000	143
		6.2.1. Fuentes de información e insumos para la modelación fluidodinámica a escala 1:2000	143
		6.2.2. Modelos fluidodinámicos para escala 1:2000	146
		6.2.3. Productos de la modelación fluidodinámica a escala 1:2000	147
		6.3. Cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000	148
		6.3.1. Fuentes de información e insumos para la cuantificación de amenaza a escala 1:2000	148
		6.3.2. Procedimiento para la cuantificación de amenaza a escala 1:2000	150
		6.3.3. Productos de la cuantificación de amenaza a escala 1:2000	156
		6.4. Integración de la cartografía de los eventos fluviotorrenciales y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000	156
		6.4.1. Fuentes de información e insumos para la integración de la cartografía de los eventos y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000	156

6.4.2. Procedimiento para la integración de la cartografía de eventos y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000	156	8.1.6. Caracterización de la amenaza a escala 1:2000	190
6.4.3. Productos de la integración de la cartografía de eventos y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000	157	8.2. Perfil de los profesionales	191
159		193	
7. Análisis de otros escenarios		Referencias	
7.1. Escenario de represamiento por detritos leñosos (DL)	161	207	
7.2. Etapas generales de la implementación de la metodología de detritos leñosos (DL)	163	Índices	
7.2.1. Zonas de aporte por detritos leñosos	166	Figuras	207
7.3. Análisis de otros escenarios	175	Tablas	209
181		213	
8. Recomendaciones finales		Anexos	
8.1. Presentación de resultados	183	Anexo 1. Formato para el inventario histórico de avenidas torrenciales	215
8.1.1. Estructura de la base de datos geográfica GDB	183	Anexo 2. Formato para la caracterización de avenidas torrenciales en campo	221
8.1.2. Área de estudio e información insumo	183	Anexo 3. Geoformas indicativas de zonas de aporte y zonas de depósito de sedimentos en avenidas torrenciales	230
8.1.3. Caracterización de avenidas torrenciales	183	Anexo 4. Encuesta para la reconstrucción de la historia fluvio-torrencial del territorio	233
8.1.4. Análisis de detonantes	189	Anexo 5. Formato de detritos leñosos	235
8.1.5. Caracterización de la amenaza a escala 1:25 000	189		

Presentación

Uno de los pilares misionales del Servicio Geológico Colombiano (SGC) es la evaluación de amenazas generadas por eventos de origen geológico. La elaboración de guías metodológicas enfocadas en este propósito corresponde a una línea de investigación de la Dirección de Geoamenazas de esta institución, que como entidad de ciencia y tecnología, también genera guías y manuales para la construcción de conocimiento geocientífico, como herramientas de apoyo a la política nacional de planificación territorial y gestión del riesgo.

A este respecto, el Gobierno nacional ha impulsado la expedición de políticas y estrategias de gestión orientadas a establecer consideraciones técnicas para la ejecución de estudios de amenaza y riesgo a tener en cuenta en la toma de decisiones, como las leyes 388 de 1997 y 1523 de 2012, y el Decreto 1077 de 2015, en donde el análisis de la amenaza por movimientos en masa y, particularmente, por avenidas torrenciales, es relevante para adelantar estrategias que eviten la pérdida de vidas humanas y económicas. Con 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 guía, en la que, reconociendo el esfuerzo y aporte que otras instituciones han realizado, se esboza una base conceptual y aplicada, y se definen criterios de calidad, uniformidad y objetividad, tanto para la elaboración como para la supervisión de estudios de amenaza por avenidas torrenciales.

Esta publicación surge como una contribución tanto al conocimiento integral del territorio como a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible; además, es producto de la experiencia acumulada por el SGC en sus más de tres décadas en el estudio de los movimientos en masa, y de la Pontificia Universidad Javeriana en la evaluación hidrológica e hidráulica asociada a este tipo de eventos.

En este contexto, es un orgullo presentar la *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*, la cual completa la serie de manuales enfocados en la implementación del Decreto 1077 de 2015, en lo concerniente a la incorporación de la gestión de riesgo en el ordenamiento territorial.

OSCAR PAREDES ZAPATA
Director general
Servicio Geológico Colombiano

Agradecimientos

Como principal premisa, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha establecido la construcción participativa de documentos metodológicos que aporten al desarrollo y gestión territorial de nuestro país. En tal sentido, la construcción de esta guía metodológica para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales se ha elaborado de forma colectiva y participativa, donde se ha integrado y promovido su apropiación social entre usuarios académicos, profesionales, investigadores, consultores, planificadores territoriales y tomadores de decisiones. Para esto, se realizaron tres talleres en los que se identificaron inicialmente las expectativas, necesidades y perspectivas de la evaluación de la amenaza de las avenidas torrenciales en nuestro país; y posteriormente se retroalimentaron los modelos conceptuales y matemáticos que representan los distintos procesos y perspectivas que involucra una avenida torrencial. En los talleres, se contó con la participación de diferentes actores nacionales e internacionales de instituciones y entidades públicas y privadas, que aportaron en función de sus experiencias, considerando las condiciones particulares del territorio nacional, las necesidades de información y las capacidades técnicas disponibles en el país, con fines de aplicabilidad en los procesos de gestión del riesgo de desastres y ordenamiento territorial.

Agradecemos la participación en los talleres por parte de docentes, investigadores y estudiantes de las siguientes instituciones: Escuela Colombiana de Carreras Industriales; Universidad Nacional, sedes Bogotá y Medellín; Universidad Santo Tomás; Universidad de Pamplona; Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Universidad de Caldas; Universidad Industrial de Santander; Universidad Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico; Universidad de Santander; Universidad del Quindío; Fundación Universitaria Agraria de Colombia; Universidad Libre; Universidad Surcolombiana; Universidad de La Guajira.

Además, agradecemos a los profesionales que, desde su experiencia y conocimiento en el ordenamiento territorial y gestión del riesgo de desastre en cada una de sus regiones, contribuyeron mediante su participación en los talleres: Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático; Corporación Autónoma Regional de Boyacá; Corporación Autónoma Regional de Chivor; Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca; Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía; Instituto Nacional de Vías; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; Autoridad Nacional de Licencias Ambientales; Fondo de Adaptación; Agencia Nacional de Infraestructura; Unidad de Planeación Minero Energética; Sociedad Colombiana de Geotecnia; Gestión del Riesgo Cundinamarca; Gobernación de Cundinamarca; Gobernación de Boyacá; Alcaldía de Mocoa; Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y todas las demás entidades.

Agradecemos el suministro de información por parte de entidades nacionales como: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam); Instituto Geográfico Agustín Codazzi; Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres; entre otras. También agradecemos a los consultores: Ingeconsult J&C S. A. S., JPG Consultores, Geocing S. A. S., Inerco Consultoría, Sagges S. A. S., Iceacsa, Terrae, Grupo de Investigación Genki, Geoestabilizaciones Solher y Geocing S. A. S., Tecniestrategia, HMV Ingenieros, Delima Marsh, entre muchos otros por su participación en los talleres.

Por último, los autores expresan un agradecimiento especial por sus importantes aportes y sugerencias a los investigadores:

Juan Antonio Ballesteros Canovas, University of Geneva, Suiza
Andrés Iroumé, Universidad Austral de Chile
María Carolina Rogelis, Unesco-IHE Institute for Water Education
Cees Van Westen, University of Twente Research information
Edier Vicente Aristizábal, Universidad Nacional de Colombia
Jordi Corominas, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech
Marcel Hürlimann, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech
Martin Mergili, University of Graz, Austria
Roland Kaitna, BOKU, Austria
Scott McDougall, The University of British Columbia, Canadá
Sergio Andrés Sepúlveda, Universidad de Chile
Stella M. Moreiras, National Scientific and Technical Research Council, Argentina
Stephen Slaughter, United States Geological Survey
Vicente César de Medina, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech
Williams José Méndez Mata, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador
Guillaume Piton, Université Grenoble Alpes, INRAE, ETNA, Grenoble, France

Introducción

El Gobierno nacional a través del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, con miras a incorporar la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial, expidió el Decreto 1807 de 2014 compilado en el Decreto 1077 de 2015 sección 3, en el que se establecen las condiciones y escalas de detalle para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en planes de ordenamiento territorial nuevos o existentes. Específicamente, la sección 3 del Decreto 1077 de 2015 establece que “se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa”. Dentro de estos estudios se plantea que se determine la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales categorizada en alta, media y baja, dependiendo de la frecuencia de ocurrencia de eventos y de sus características de profundidad de lámina de agua, materiales de arrastre y velocidad del flujo.

Por su parte, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), conforme a su objeto y funciones estipulados en el Decreto 4131 de 2011 en el artículo 3, referente a “realizar la investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo; adelantar el seguimiento y monitoreo de amenazas de origen geológico; administrar la información del subsuelo”, y con el fin de brindar un apoyo técnico a las administraciones locales para la toma de decisiones respecto a las diferentes amenazas de origen geológico, ha liderado la evaluación de amenaza por movimientos en masa, con la elaboración de la *Guía para zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017) y la *Guía para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa escala 1:5000* (Ávila *et al.*, 2016); sin embargo, prevalece la necesidad de construir una metodología de evaluación de amenaza por avenidas torrenciales con fines de ordenamiento territorial. En este marco, el SGC y la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) suscribieron el convenio especial de cooperación 020 de 2019 con el objeto de desarrollar una guía metodológica que tenga las pautas principales para la evaluación de las avenidas torrenciales.

Esta guía fue propuesta bajo consideraciones de viabilidad técnica y replicabilidad en el contexto nacional, teniendo en cuenta la complejidad del proceso de una avenida torrencial mediante la integración de varias disciplinas de la ingeniería con las geociencias y la reproducción del proceso para representar posibles escenarios, y evaluar la amenaza en función de la frecuencia de ocurrencia de los eventos. En este documento se proporcionan lineamientos técnicos para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales, los cuales permiten disminuir la subjetividad a la hora de abordar el problema, y sirven, además, como herramienta para la unificación de conceptos y elaboración de estudios uniformes. Los procedimientos aquí propuestos fueron estudiados y seleccionados de tal forma que pudieran ser replicados con la información disponible en el país; sin embargo, si existe información de mejor calidad y más detallada, los especialistas pueden adoptar métodos con mayores niveles de complejidad.

Como se mencionó en los agradecimientos, se realizaron tres talleres con la comunidad interesada, con el objetivo de lograr la construcción colectiva y participativa de la guía. Esto permitió que todos sus componentes fueran propuestos teniendo presente que esta debe ser replicable por parte de los profesionales encargados de la elaboración, supervisión y administración de estudios de amenaza por avenidas torrenciales, planificadores y tomadores de decisiones en el ámbito de la administración pública, y académicos e investigadores en el área de la gestión del riesgo por amenazas naturales.



En el capítulo 1 se describe el marco conceptual en el que se fundamenta la metodología. Este contempla los conceptos utilizados a lo largo del documento y el alcance del marco normativo que rige la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales. El capítulo 2 aborda la delimitación del área de estudio, las escalas de trabajo, los modelos de elevación digital disponibles y demás información considerada como insumo para la replicabilidad de la metodología.

En el capítulo 3, se presenta el procedimiento para llevar a cabo la caracterización de avenidas torrenciales. El capítulo 4 describe el procedimiento propuesto para el análisis de detonantes, específicamente las lluvias intensas como principal detonante de las avenidas torrenciales en Colombia. El capítulo 5 hace referencia a la caracterización de la amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000. El capítulo 6 corresponde a la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000.

Teniendo en cuenta que, dadas las condiciones particulares de los territorios, es posible que se presenten escenarios como represamientos causados por material proveniente de movimientos en masa o material vegetal que se convierte en detritos leñosos y fallas de diques, entre otros, en el capítulo 7 se reportan los criterios para la evaluación de estos escenarios en caso de que se presenten evidencias que favorezcan la ocurrencia de alguno de ellos. Finalmente, en el capítulo 8 se presentan recomendaciones finales relacionadas con la presentación de los resultados y los perfiles profesionales requeridos para la aplicación de la metodología.

Es importante aclarar que durante el desarrollo de la metodología se aplicaron los procedimientos en algunas zonas del país; sin embargo, la implementación de casos piloto constituye la etapa de validación que continuará realizando el SGC y demás usuarios de la guía.



Sierra Nevada del Cocuy
Guicán, Boyacá
Fotografía de Andrés Reyes



1

Generalidades



Avenida torrencial de la quebrada el Mono
Vereda La Virginia
Chaparral, Tolima
Fotografía de Andrés Reyes

Los desastres causados por grandes flujos son frecuentes en el medio colombiano, y su ocurrencia está asociada con cantidades significativas de agua, aire y sedimentos que, en ciertas condiciones, se comportan temporalmente como fluidos sometidos por la acción de la gravedad. Un grupo particular de flujos, comúnmente denominados *avenidas torrenciales* o *flujos de detritos*, presentan altas velocidades, grandes fuerzas de impacto y largos recorridos; estos procesos han sido causantes de algunos de los desastres más devastadores de la historia, tanto en Colombia como en el resto del mundo (Skermer y VanDine, 2005). Aunque algunas veces, los términos *avenida torrencial* o *flujo de detritos* son utilizados en la literatura como un vocablo general que agrupa y describe todos los procesos de este tipo, sin importar las diferencias y los matices en cada caso (Jakob y Hungry, 2005). El comportamiento general de toda la masa varía dependiendo de las características y las proporciones de los diferentes componentes involucrados; por ejemplo, masas con diversas concentraciones de sedimento o diferentes tipos de sedimento van a comportarse de forma diferente. Por lo anterior, el enfoque adoptado en este documento se basa en la construcción del concepto de *avenida torrencial* a partir de los resultados del trabajo técnico, de los talleres participativos y de las definiciones que han sido trabajadas y acordadas por otros para los diferentes flujos que, se considera, forman parte de las *avenidas torrenciales*.

La definición de *avenida torrencial* adoptada en este documento se refiere a un flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas que

puede ser generado por efecto de lluvias intensas. Involucra el transporte de una mezcla entre agua y un contenido significativo de sólidos en diferentes proporciones. El aporte de sólidos al flujo puede provenir de las laderas adyacentes o del lecho de los cauces. Finalmente, cuando el flujo alcanza zonas de baja pendiente se genera el depósito del material a lo largo de su trayectoria. En la anterior definición, se considera que los flujos de detritos, los flujos de lodos y los flujos hiperconcentrados (inundaciones de detritos e inundaciones de lodos) son los flujos involucrados en el concepto de *avenida torrencial* (sección 1.2.).

En el país, se ha abordado la problemática de la evaluación de amenaza por *avenidas torrenciales* empleando diferentes métodos y procedimientos relacionados con la simulación de la dinámica del flujo; sin embargo, hasta el momento no existían lineamientos metodológicos explícitos para zonificación de amenaza por *avenidas torrenciales* que consideraran arrastre de material y que permitieran la categorización de zonas en función de la frecuencia de ocurrencia de los eventos y características del flujo, con fines de ordenamiento territorial. En este sentido, la propuesta de cada procedimiento se realizó a partir de la revisión de información disponible en Colombia y se seleccionó la que se consideró más apropiada para cada proceso; sin embargo, es importante resaltar que la calidad de la información que se utilice es la base fundamental de los resultados. En función de la optimización de los recursos de los municipios y teniendo en cuenta que la normatividad vigente exige la evaluación de amenaza por movimientos en masa, mucha de la información que se considera insumo para los

procedimientos propuestos en esta guía proviene de la generada en la evaluación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25 000 de acuerdo con la guía metodológica desarrollada por el SGC (Rodríguez *et al.*, 2017) y que, además, acoge el principio de gradualidad consignado en el Decreto 1807 de 2014.

1.1. Marco conceptual

El SGC, en cumplimiento de su objeto, ha desarrollado diferentes evaluaciones de amenaza por avenidas torrenciales que se muestran en la figura 1 en orden cronológico. Se observa que se han usado diferentes procedimientos de tipo empírico, simulaciones de flujo, métodos implícitos o de observación directa.

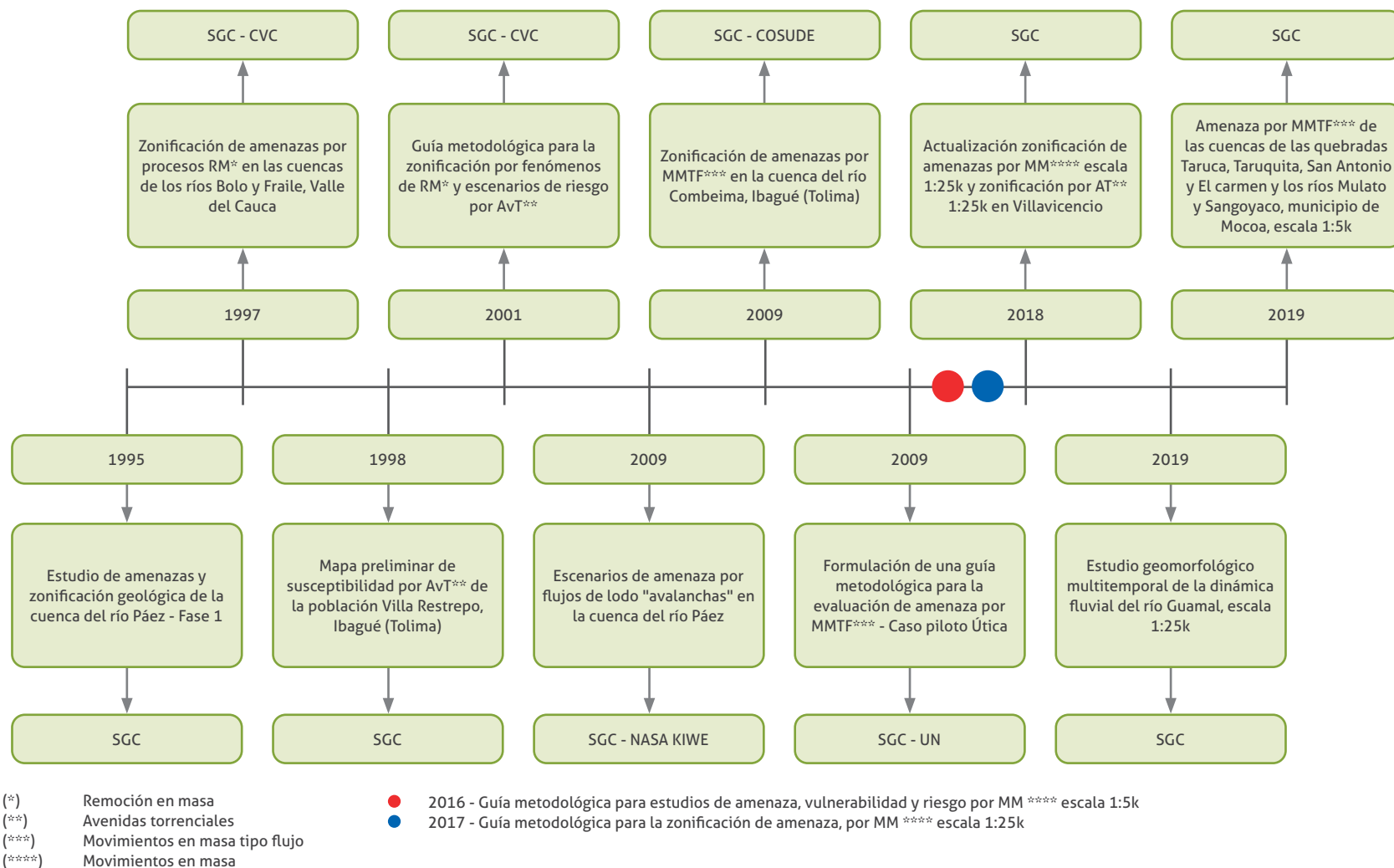
La evaluación de amenaza por avenidas torrenciales requiere de la integración de diferentes ramas de la ingeniería unidas con las geociencias, debido a que es un proceso complejo que incluye el estudio de condiciones geológi-

cas-geomorfológicas, geotécnicas e hidroclimáticas de la zona. Además de las características de la dinámica del flujo que transita por el cauce hasta depositarse en zonas de cambio de pendiente donde comúnmente se encuentran ubicados centros poblados.

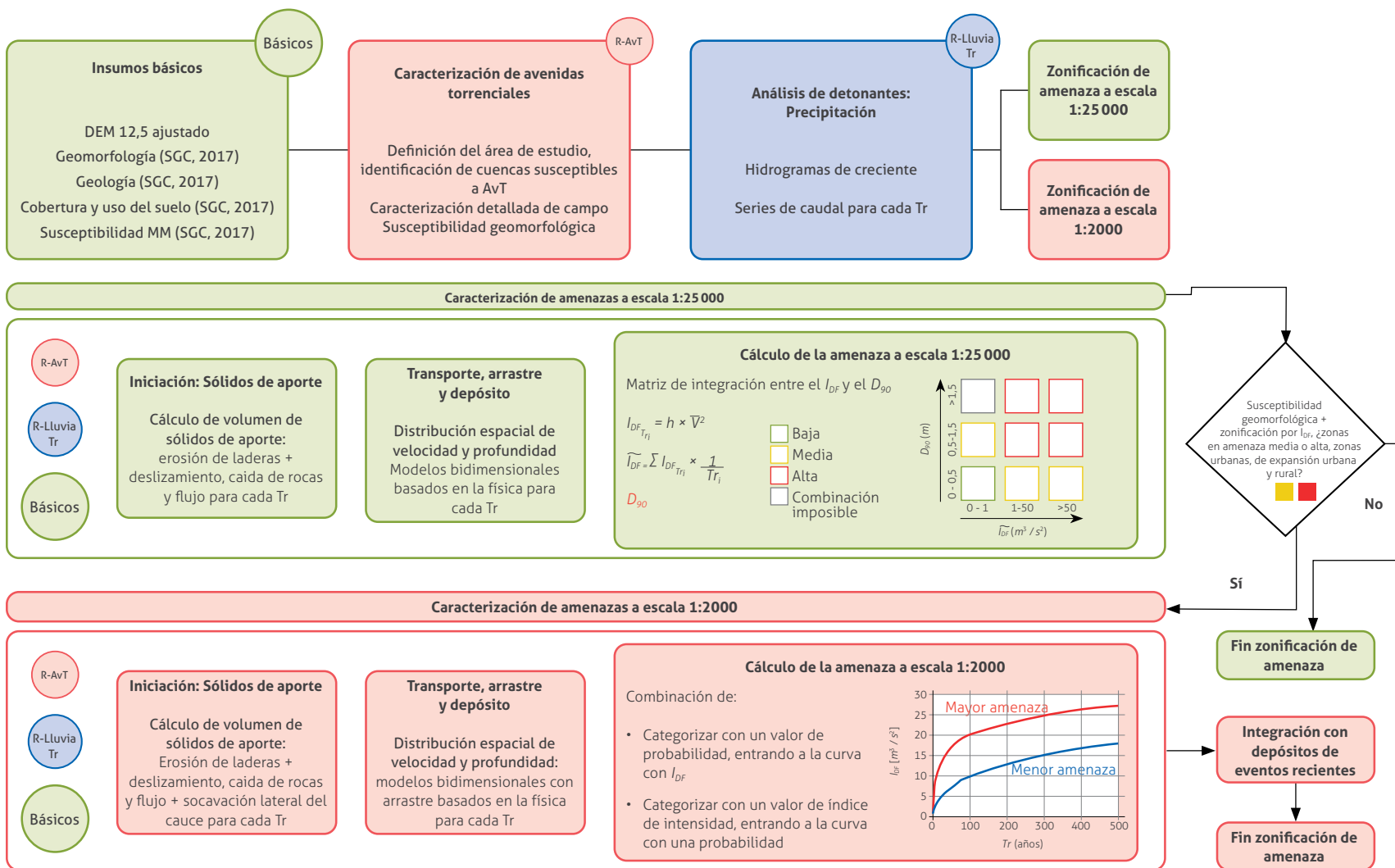
En este apartado se presentan de manera general las cuatro etapas fundamentales propuestas para analizar los procesos geológico-geomorfológicos, geotécnicos, hidrológicos y fluidodinámicos que se involucran en una avenida torrencial, con el fin de determinar su zonificación de amenaza. En la figura 2 se presenta el esquema metodológico para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales. Allí se observan en la parte superior las dos primeras etapas: *R-AvT Caracterización de avenidas torrenciales* y *R-LLUVIA Tr Análisis de detonantes*, de las que se obtienen resultados que se utilizan en las dos etapas siguientes: *Caracterización de amenaza a escala 1:25 000* y *Caracterización de amenaza a escala 1:2000*.



Avenida torrencial quebrada Negra
Utiya, Cundinamarca, 2012
Fotografía de Andrés Reyes



» **Figura 1.** Evolución de la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales elaboradas por el SGC



» **Figura 2.** Esquema metodológico para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales

1.1.1. Caracterización de avenidas torrenciales

La caracterización de avenidas torrenciales busca reconstruir la historia fluviotorrencial de una cuenca a partir de fuentes de información secundaria y de su registro geomorfológico y sedimentológico. De igual manera, en esta etapa se caracterizan y representan cartográficamente los factores condicionantes que interactúan en la ocurrencia de una avenida torrencial, como parte de los insumos necesarios para la evaluación de la amenaza. Para ello se parte de la caracterización geoambiental realizada en el marco de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa a escala 1:25 000, entre otras fuentes consideradas necesarias por el grupo interdisciplinario de profesionales en el desarrollo de la reconstrucción histórica del territorio.

La caracterización de avenidas torrenciales está constituida por tres fases: 1) recopilación y análisis de información secundaria, 2) caracterización de avenidas torrenciales en campo e 3) integración de los resultados. La primera fase consiste en buscar evidencias de avenidas torrenciales que hayan ocurrido en el territorio a partir de fuentes de información secundaria, fotointerpretación de geoformas que indiquen aporte directo de sedimentos al canal y zonas de depósitos fluviotorrenciales. En esta fase, además, se lleva a cabo el análisis multitemporal de movimientos en masa con el propósito de identificar los movimientos considerados fuente constante de sedimentos, que por su volumen y la morfología del canal pudieran generar represamientos. La segunda fase corresponde a la caracterización de los depósitos y macizos rocosos presentes a lo largo de la zona de tránsito mediante cartografía de campo, donde sea posible. Con esta actividad se busca corroborar e identificar geoformas indicativas de aporte, y el volumen de sedimentos que estas pueden contribuir a un flujo, así como determinar los tramos donde hay erosión lateral y donde pueden ocurrir represamientos. Por otra parte, el trabajo de campo también tiene como objetivo hacer la cartografía de los eventos o depósitos dejados por los flujos en la zona de acumulación principal de la cuenca o también llamada zona de depósito, esto con el objetivo de conocer los tipos de flujos y las magnitudes que

han presentado a partir de sus áreas y espesores. En la última fase se hace la integración de los resultados de las actividades realizadas preliminarmente y durante el trabajo de campo.

1.1.2. Análisis de detonantes

Se propone como detonante principal de avenidas torrenciales la precipitación, variable que es usada como un evento de corto plazo representado por un hietograma que relaciona una profundidad y una duración; dicha representación también simula la magnitud y distribución temporal de una posible tormenta, posterior a un análisis intensidad/duración/frecuencia que, mediante el periodo de retorno, indica qué tan inusual y extremo es el evento. Adicionalmente, es la entrada para un modelo hidrológico que represente el proceso lluvia/infiltración/escorrentía dentro de unidades de modelación seleccionadas y construidas previamente bajo lineamientos compartidos entre las ramas de geología, geotecnia, hidrología e hidrodinámica.

El modelo hidrológico entrega como producto las hidrógrafas de creciente generadas por las unidades de modelación construidas dentro del área de estudio para los periodos de retorno propuestos de 2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años, donde las hidrógrafas son la entrada para los modelos propuestos en las ramas de geotecnia e hidrodinámica.

La información base necesaria para desarrollar el proceso descrito es la siguiente:

- » Precipitación: curva de intensidad/duración/frecuencia (IDF) o precipitación a resolución temporal subdiaria o diaria, sea de origen terrestre o satelital.
- » Topografía: modelo de elevación digital del área de estudio como base para la construcción de unidades de modelación y generación de drenajes.
- » Coberturas y litología: información base necesaria para la definición de parámetros en los modelos lluvia/infiltración/escorrentía.

1.1.3. Caracterización de la amenaza a escala 1:25 000

El Decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, en su artículo

2.2.2.1.3.1.3, establece que “se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa” y teniendo en cuenta la relación entre clases de suelos y escalas determinadas en la Ley 388 de 1997, la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales en zona rural debe realizarse a escala 1:25 000.

De acuerdo con lo anterior, se propone que la caracterización de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000 identifique las zonas en las cuales debe evaluarse de manera detallada la amenaza (escala 1:2000); el reconocimiento de estas zonas se basa en el análisis de la categorización que se adelanta en función de las alturas y velocidades producto de la simulación de la dinámica del flujo (modelación fluido/dinámica), de la variable granulométrica característica de los depósitos de eventos antiguos y de la susceptibilidad geomorfológica que se obtiene en el proceso de caracterización de avenidas torrenciales (sección 5.4.3.).

Dado que esta etapa contempla la modelación fluidodinámica, se requieren como entradas los caudales generados en el análisis de detonantes (sección 1.1.2.), los volúmenes de material sólido proveniente de deslizamientos, caídas de rocas y flujo y los volúmenes de sólidos generados por la erosión de laderas causada por la lluvia.

De la modelación fluidodinámica se obtienen resultados de alturas y velocidades del flujo para diferentes periodos de retorno, con los cuales se calcula el valor del índice de intensidad de flujo para cada pixel de la zona modelada. Los resultados de este índice se integran con la variable granulométrica característica de los depósitos y se obtiene una categorización de la zona en amenaza alta, media y baja. La categorización obtenida se integra con la susceptibilidad geomorfológica obtenida en la fase de caracterización de avenidas torrenciales, para así alcanzar las categorías de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000.

Si en el resultado de zonificación se encuentran categorías de amenaza alta o media por avenidas torrenciales, en zonas urbanas o de expansión urbana, estas zonas se deben evaluar a escala

1:2000 (figura 2) con la información específica detallada en la sección 5.4.3.1., conforme al Decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en su artículo 2.2.2.1.3.1.3., y atendiendo a la relación entre clases de suelos y escalas expresadas en la Ley 388 de 1997.

1.1.4. Caracterización de la amenaza a escala 1:2000

La caracterización de la amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000 tiene como objetivo zonificar de manera detallada la amenaza en las zonas urbanas, de expansión urbana y en las áreas categorizadas en amenaza alta y media a escala 1:25 000. En este grado de especificidad se pretende tener en cuenta la morfodinámica propia de los procesos de avenida torrencial, que involucra arrastre, transporte y deposición de material a lo largo del cauce.

Para esto se propone que la fluidodinámica sea modelada con herramientas que permitan reproducir la reología del flujo y el arrastre de material, junto con la incorporación de los materiales sólidos provenientes de inestabilidades causadas por socavación lateral del cauce. Donde la modelación fluidodinámica tiene como entradas los caudales en la etapa del análisis de detonantes, los volúmenes de sólidos provenientes de movimientos en masa, caídas de rocas y flujos, y de la erosión de laderas obtenidos en la caracterización de la amenaza a escala 1:25 000, además de los volúmenes de sólidos provenientes de inestabilidades ocasionadas por socavación lateral del cauce, que deben ser estimados con la información levantada en campo de las zonas a detallar.

Como resultado de la modelación fluidodinámica se obtienen las alturas y velocidades para diferentes periodos de retorno, con los cuales se calcula el índice de intensidad de flujo (IDF). Para cada pixel, se obtiene la curva de amenaza compuesta por el índice de intensidad de flujo vs. el periodo de retorno. Con esta curva se realiza la categorización de la amenaza cuantitativa y se define la zonificación de amenaza, que se integra con los depósitos recientes para obtener la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000.

1.1.5. Otros escenarios

La zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales debe incluir la evaluación de escenarios adicionales que puedan representar la obstrucción del flujo o modificar la dirección del transporte del material movilizado o modificar el volumen de material transportado (detritos leñosos). Estos escenarios contemplan represamientos del cauce por movimientos de masa, represamientos del cauce por acumulación de detritos leñosos, aporte extraordinario de material vegetal (detritos leñosos) y ruptura (avulsión) de diques naturales o artificiales a lo largo del cauce.

Los escenarios de represamientos por movimientos de masa se pueden tener en cuenta identificando las posibles zonas con movimientos de masa transversales a la dirección del flujo del cauce (p. ej., deslizamientos, caídas de rocas), evaluando su probabilidad de falla a través de las características de la presa formada y contrastando si el volumen movilizado logra represar parcial o totalmente el canal (sección 7.1.1.).

Para la evaluación de los escenarios adicionales se requiere identificar los puntos de represamientos históricos, zonas del valle susceptibles a represarse, puntos donde existen diques de redireccionamiento (barreras de protección), características geométricas de la presa formada, identificación de movimientos de masa previos y sobre el cauce principal, características y dimensiones de los especímenes fustales (diámetro a la altura de pecho, altura del individuo y densidad de individuos por unidad de área).

1.2. Glosario

Amenaza (H). Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para ocasionar 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 (Ley 1523 de 2012) (UNGRD, 2017).

Avenida torrencial. Flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas, que puede ser generado por efecto de lluvias intensas. Involucra el transporte de una mezcla de agua y un contenido significativo de sólidos en diferentes proporciones. El aporte de sólidos al flujo puede provenir de las laderas adyacentes o del lecho de los cauces. Finalmente, cuando el flujo alcanza zonas de baja pendiente se genera el depósito del material a lo largo de su trayectoria. (Esta definición fue generada para la guía a partir de los resultados del trabajo técnico y de los talleres participativos).

Cuenca hidrográfica. Sistema definido por un territorio que es drenado por una única red de drenaje natural. Es decir que el agua de su interior es entregada al mar o a un lago a través de un único río. La forma en la que es delimitada está directamente ligada con la topografía, siendo esto mediante su línea de cumbres, conocida como divisoria de aguas (Chow *et al.*, 1994).

Curva de amenaza. Relación entre la probabilidad de excedencia (asociada al periodo de retorno) y la variable usada para caracterizar la intensidad de un evento amenazante en un punto determinado (Naaim *et al.*, 2009).

Detritos leñosos. Elementos vegetales con longitud y diámetro superior a 1 m y 10 cm, respectivamente, ubicados en proximidad a las bancas del cauce (Piton y Recking, 2016). De acuerdo con los aumentos del caudal del cauce o por la movilización del terreno de soporte, dichos elementos pueden ser incorporados al flujo, causando acumulaciones y obstrucciones en secciones transversales del canal. Las obstrucciones pueden incidir en la dinámica del flujo como elementos de resistencia, modificando el transporte, arrastre y depósito del material movilizado (Daniels y Rhoads, 2003).

Elementos en riesgo (E). Personas y sus propiedades, actividades económicas, infraestructura

y servicios públicos (entre otros) que se encuentran en un área con determinado valor de amenaza. La forma más común de cuantificar los elementos en riesgo es asignar un valor económico a los bienes materiales y personas en el área de estudio, alternativamente es posible cuantificarlos usando la cantidad de vidas humanas potencialmente afectadas (Naciones Unidas, 1992).

Erosión. Proceso de desprendimiento, remoción y transporte de partículas de suelo o material rocoso por parte de los agentes erosivos (agua, viento, gravedad). En un sentido geomorfológico, este término se utiliza habitualmente en referencia a una unidad paisajística concreta, como una ladera o una cuenca (Webster, 2005).

Escenarios de amenaza. Escenarios que se generan en función de eventos con periodos de retorno particulares (usualmente asociados a lluvia o sismo) con el fin de evaluar la amenaza. Cada uno de los escenarios de amenaza está ligado a un tipo de avenida torrencial (Naaim *et al.*, 2009).

Flujo de detritos. Flujo muy rápido (5×10^{-1} mm/s) a extremadamente rápido (5×10^3 mm/s) (Hungry *et al.*, 2014) con altas concentraciones volumétricas de sedimentos (>60 % vol.) (Jakob y Hungry, 2005) que se transportan a lo largo de un canal empinado con fuerte poder de arrastre. Se distingue de otros movimientos en masa porque ocurre en quebradas y canales de drenaje de primer o segundo orden. El flujo puede ser iniciado por un deslizamiento, una avalancha de detritos o caída de rocas a partir de una banca empinada o por inestabilidad espontánea del fondo del canal empinado. Este tipo de flujo puede incluir un amplio rango de tamaños de detritos, desde un contenido importante de finos hasta la presencia de bloques (Coussot y Meunier, 1996; Graf *et al.*, 2018). Dado que la velocidad de los sólidos y el agua es similar, se considera como un flujo de una fase (Coussot y Meunier, 1996; López *et al.*, 2003; Pierson, 2005; Takahashi, 2014) no newtoniano (Coussot y Meunier, 1996; López *et al.*, 2003; Takahashi, 2014), cuyo comportamiento

reológico varía en función de la cantidad de clastos gruesos embebidos, así como de la proporción de la cantidad de material fino y la cantidad de arena en la matriz (Major y Pierson, 1992).

Flujos hiperconcentrados. Flujos con menores concentraciones de sedimentos que los flujos de detritos, pero con mayores concentraciones que las crecientes de agua (Coussot y Meunier, 1996; Jakob y Hungry, 2005; Nemec, 2009; Pierson, 2005). Los valores de concentración volumétrica de sedimentos para este tipo de flujo varían ampliamente entre los autores, sin embargo, existe un rango promedio entre 5 %-60 % (Coussot y Meunier, 1996; Nemec, 2009; Pierson, 2005). Ya que los flujos hiperconcentrados corresponden a un estado transicional entre una creciente de agua y un flujo de altas concentraciones, estos presentan una o dos fases (Benvenuti y Martini, 2009; Coussot y Meunier, 1996; Nemec, 2009), donde puede predominar la turbulencia o ser laminares hacia la base y turbulentos hacia el tope (Benvenuti y Martini, 2009). Ese comportamiento turbulento o laminar/turbulento puede ser evidenciado en las estructuras sedimentarias de los depósitos acumulados por el flujo. Además, debido a las diferencias de velocidad entre los sólidos y el agua estos son usualmente considerados flujos bifásicos (Coussot y Meunier, 1996). Este tipo de flujos están asociados a un comportamiento reológico de tipo dilatante (Julien y Lan, 1991), que puede ser descrito mediante ecuaciones constitutivas como las propuestas por Herschel y Bulkley (1926) (con $n > 1$) y (O'Brien y Julien, 1988). Algunos autores subdividen los flujos hiperconcentrados en inundaciones de detritos e inundación de lodos:

» *Inundación de detritos:* flujo rápido de agua que transporta una gran cantidad de detritos con una mezcla de arena gruesa y grava pobremente estratificada. (PMA-GCA, 2007). Se diferencia del flujo de detritos en que presumiblemente mantiene características de un fluido newtoniano y no presenta un comportamiento pulsante (Pierson, 2005).

- » Inundación de lodos: flujo rápido que se encuentra en el punto medio entre una inundación que está compuesta por agua clara; y un flujo de lodo que puede movilizar barro, arena y grava, incluyendo cantos grandes (Pierson, 2005).

Flujo de lodos. Flujo canalizado muy rápido (5×10^{-1} mm/s) a extremadamente rápido (5×10^3 mm/s) (Hungry *et al.*, 2014) con altas concentraciones volumétricas de sedimentos (>60 % vol.) (Hungry *et al.*, 2014), predominando el contenido de finos sobre el material detrítico (Coussot y Meunier, 1996; Takahashi, 2014), donde por lo menos el 50 % del material tiene un tamaño menor al de las arenas (Pierson, 2005). Este tipo de flujo se caracteriza por presentar alta turbulencia desde el frente hasta la cola (Takahashi, 2014), por lo cual sus depósitos tienden a desarrollar una estructura sedimentaria masiva (o sin estructura). El material involucrado en este tipo de flujo dreña más lentamente y permanece más tiempo en condición líquida, permitiendo viajes más largos y ángulos de pendiente más bajos en el área de depósito (Hungry *et al.*, 2014). Dado que la velocidad de los sólidos y el agua es similar se considera flujo de una fase (Coussot y Meunier, 1996; López *et al.*, 2003; Pierson, 2005; Takahashi, 2014), cuyo comportamiento reológico se encuentra en el rango entre pseudoplástico a Bingham (Major y Pierson, 1992; Naef *et al.*, 2006).

Frecuencia. Tasa a la cual se repite un evento en un periodo de tiempo dado (Chow *et al.*, 1994).

Índice de intensidad de flujo. Variable utilizada para caracterizar la intensidad de los eventos y se define con la siguiente expresión: $I_{DF} = h_{m\acute{a}x} \|\vec{u}\|_{m\acute{a}x}^2$ donde $h_{m\acute{a}x}$ es la profundidad máxima del flujo y $\|\vec{u}\|_{m\acute{a}x}$ es la magnitud máxima de la velocidad del flujo. Propuesta por Jakob *et al.* (2012) es físicamente representativo de la fuerza de impacto y la evidencia muestra que tiene una alta correlación con el nivel de daño observado (mayor que la de otras variables que también han sido usadas para caracterizar la amenaza).

Intensidad. Grado de fortaleza con el que se manifiesta un evento, alude a la capacidad de generar daño sobre los elementos en riesgo. Las variables más comunes para evaluar la intensidad de una avenida torrencial son la profundidad y la velocidad del flujo (o alguna combinación de estas) (Naa'im *et al.*, 2009).

Intervalo de recurrencia. Tiempo entre dos ocurrencias de un evento con ciertas características (Chow *et al.*, 1994).

Magnitud. Tamaño de un evento, en el caso de las avenidas torrenciales, una variable asociada a la magnitud es el volumen del material depositado (Naa'im *et al.*, 2009).

Periodo de retorno. Representa la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado en un periodo de tiempo determinado. Es la cantidad de tiempo para la cual la probabilidad de ocurrencia se distribuye uniformemente en los periodos que componen este lapso de tiempo; así pues, un periodo de retorno de 100 años equivale a una probabilidad de excedencia de $1/100 = 0,01$ o 1 % para un año cualquiera (la probabilidad de excedencia para cada año será del 1 %).

Probabilidad de ocurrencia. Medida de la posibilidad de que un evento ocurra. Puede ser definida, medida o determinada, y se representa de forma cualitativa o cuantitativa en términos de probabilidad o frecuencia (ISO/IEC, 2009) (UNGRD, 2017).

Probabilidad de excedencia. Probabilidad de que una variable iguale o exceda un determinado valor en un periodo de tiempo determinado (Chow *et al.*, 1994).

Riesgo de desastres. Daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un periodo de tiempo específico. Se determinan por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación

de la amenaza y la vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012) (UNGRD, 2017).

Riesgo de un escenario (R_s). Valor esperado de pérdida en un lugar debido a la posible ocurrencia de un evento determinado, en la práctica puede estimarse el riesgo de un escenario aproximando la amenaza como la resta de las probabilidades de excedencia entre escenarios de amenaza sucesivos. Puede expresarse matemáticamente de forma sencilla y simplificada como el producto de la amenaza (H) y la vulnerabilidad (V), es decir: $R_s = HV$ adaptado de Naaim *et al.* (2009).

Riesgo total (R_t). Total esperado de pérdidas de vidas humanas o el costo de los daños económicos esperados en el área de interés. Matemáticamente, este valor esperado puede expresarse de la siguiente manera (aunque en la práctica los cálculos se realizan de forma discreta, como se describió en el riesgo de un escenario):

$$R_t = \int_H \left(\sum_A [R_s(H, V) E(H)] \right) dH$$

Donde, H se refiere a la amenaza, A al área alcanzada por el evento, V a la vulnerabilidad, R_s al riesgo específico (que es función de la amenaza y la vulnerabilidad) y E a los elementos en riesgo (que son función de la amenaza porque eventos con diferentes probabilidades de ocurrencia afectan zonas diferentes) adaptado de Naaim *et al.* (2009).

Socavación lateral. Movilización de las partículas de material que conforman las bancas del cauce por acción de las fuerzas de corte en la dirección del flujo (Chow *et al.*, 1994). Dichas fuerzas aplican un empuje sobre el área de contacto del material de la banca, ocasionando la falla de la pared del cauce debido al desarrollo de los procesos erosivos en la base del talud y el aumento desestabilizante asociado a su inclinación (Tardío, 2013).

Susceptibilidad. Posibilidad que tiene un área a presentar un evento peligroso (Naaim *et al.*, 2009).

Unidades de modelación. Zonas que se encuentran dentro del área de estudio. Son construidas con el fin de modelar procesos de avenidas torrenciales, acoplando adecuadamente las ramas de geología, geotecnia, hidrología y fluidodinámica. La unidad de modelación se delimita con el mismo principio que demarca la divisoria de aguas de una cuenca hidrográfica; sin embargo, según sea el caso, no necesariamente cumple los requisitos estrictos de una divisoria de aguas ya que, dependiendo de la división que se proponga del área de estudio, algunas corrientes pueden atravesar estas divisorias, razón por la cual se denominan *unidades de modelación*.

Los puntos de concentración de estas unidades se ubican según los requerimientos de los componentes involucrados en la modelación y caracterización (geología, geotecnia, hidrología y fluidodinámica), siempre con miras a representar adecuadamente el aporte, transporte y depósito de material. En los puntos de concentración de las unidades se acoplan los caudales líquidos, sedimentos en suspensión y material sólido con el modelo fluidodinámico para ser transportados. La construcción de unidades de modelación es caso dependiente, por tanto, no es posible dictar lineamientos estrictos para su delimitación. No obstante, se dan recomendaciones y puntos claves a tener en cuenta al momento de generarlas. Esta definición fue generada para esta guía a partir de los resultados del trabajo técnico.

Zonificación. División de la superficie de la Tierra en diferentes áreas con comportamiento similar; cada una de estas se clasifica según los valores de susceptibilidad, amenaza o riesgo, encontrados para cada región del territorio. La zonificación de amenaza es un instrumento de ordenamiento territorial que apoya la planeación y la toma de decisiones (adaptado de Naciones Unidas, 1992).

1.3. Alcance

La metodología propuesta fue desarrollada con el objetivo de servir como herramienta para la toma de decisiones en el ordenamiento territorial de los municipios colombianos, fundamentada en las especificaciones establecidas en el Decreto 1077 de 2015, expedido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, sección 3, que establece las condiciones técnicas para la elaboración de estudios de amenaza para revisión o elaboración de planes de ordenamiento territorial.

Dicha norma, en su artículo 2.2.2.1.3.2.1.3, establece que, para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales se debe tener en cuenta la geomorfología, el estudio hidrológico de la cuenca y el análisis hidráulico que involucre factores detonantes como precipitación o movimientos en masa. Además, expresa como alcance de los estudios de amenaza por avenidas torrenciales la categorización de la amenaza en alta, media y baja en función de la frecuencia de ocurrencia de eventos y de sus características de profundidad de lámina de agua, materiales de arrastre y velocidad del flujo, utilizando como mínimo análisis estadísticos, determinísticos o probabilísticos. Teniendo en cuenta lo anterior, la guía ofrece lineamientos para atender el alcance establecido en el mencionado decreto, para la elaboración de estudios de amenaza por avenidas torrenciales, considerando la precipitación como el detonante principal, sin embargo, otros detonantes pueden ser considerados a criterio de los especialistas.

La guía metodológica se desarrolló en función de la viabilidad técnica y de disponibilidad de información en el territorio colombiano con la intención de disminuir la subjetividad en los procesos que se adoptan para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales. En este sentido, se propone utilizar información generada en la evaluación de otras amenazas, como la caracterización geoambiental y la susceptibilidad a movimientos en masa generada para la zonificación de amenaza por movimientos en masa

(Rodríguez *et al.*, 2017), además, es posible utilizar como información secundaria, la generada en POT existentes, Pomcas y demás estudios que exige la normatividad.

El análisis de avenidas torrenciales es un proceso que cambia en el tiempo, cuya amenaza presenta condiciones geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidroclimatológicas y fluidodinámicas para un escenario específico, que puede variar en función de la dinámica del territorio. Por lo tanto, la evaluación de la amenaza requiere actualización periódica.

Las escalas de trabajo propuestas están basadas en la exigencia del Decreto 1077 de 2015, del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que se relacionan con el alcance según el tipo de estudio, que para el caso de la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales es básico, desarrollado en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural de los municipios; establecidas en la Ley 388 de 1997. En suelos rurales la evaluación debe ser analizada a escala 1:25 000, y para suelos urbanos y de expansión urbana a escala 1:2000. La definición de las escalas debe representar el comportamiento propio del proceso, el cual se genera en la parte alta de un cauce (zona rural, se transporta a lo largo de este (área rural la principalmente) y finaliza en su zona de depósito (normalmente zonas urbanas y de expansión urbana). La zona de estudio de una avenida torrencial debe involucrar la subcuenca hidrográfica del cauce por el que se transporta donde se propone abordar la amenaza a escala 1:25 000 inicialmente; luego se identifican las zonas a detallar y a evaluar a escala 1:2000 en las zonas urbanas, de expansión urbana y en las áreas categorizadas en amenaza alta y media a escala 1:25 000.

El alcance de esta metodología es la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales, por lo que aspectos sociales, culturales y económicos de la zona de estudio son difíciles de involucrar. Por esta razón, los costos o fuentes de financiación, y los aspectos de educación, prevención o mitigación en el ámbito de la gestión de riesgo de desastres no se incluyen en el presente documento.



» Panorámica de Guacamayas, Boyacá
Fotografía de Andrés Reyes

An aerial photograph of a mountainous region. The left side shows a steep, forested slope. The right side shows a valley with rolling green hills and a small village with a prominent church. The entire image is overlaid with a semi-transparent green filter.

2

**Área de estudio,
información,
cartografía básica
y modelo digital de
terreno (MDT)**



Río Jamundí
Jamundí, Valle del Cauca, 2020
Fotografía de Andrés Reyes

La normatividad vigente establece requerimientos técnicos para la definición del área de análisis e insumos para la elaboración de estudios de amenaza por avenidas torrenciales (Decreto 1077 de 2015, sección 3), por lo que los procedimientos buscan atender a los requerimientos técnicos y se basan en el comportamiento propio del proceso de una avenida torrencial, en el que es necesario evaluar las características del cauce desde su parte alta y sus laderas.

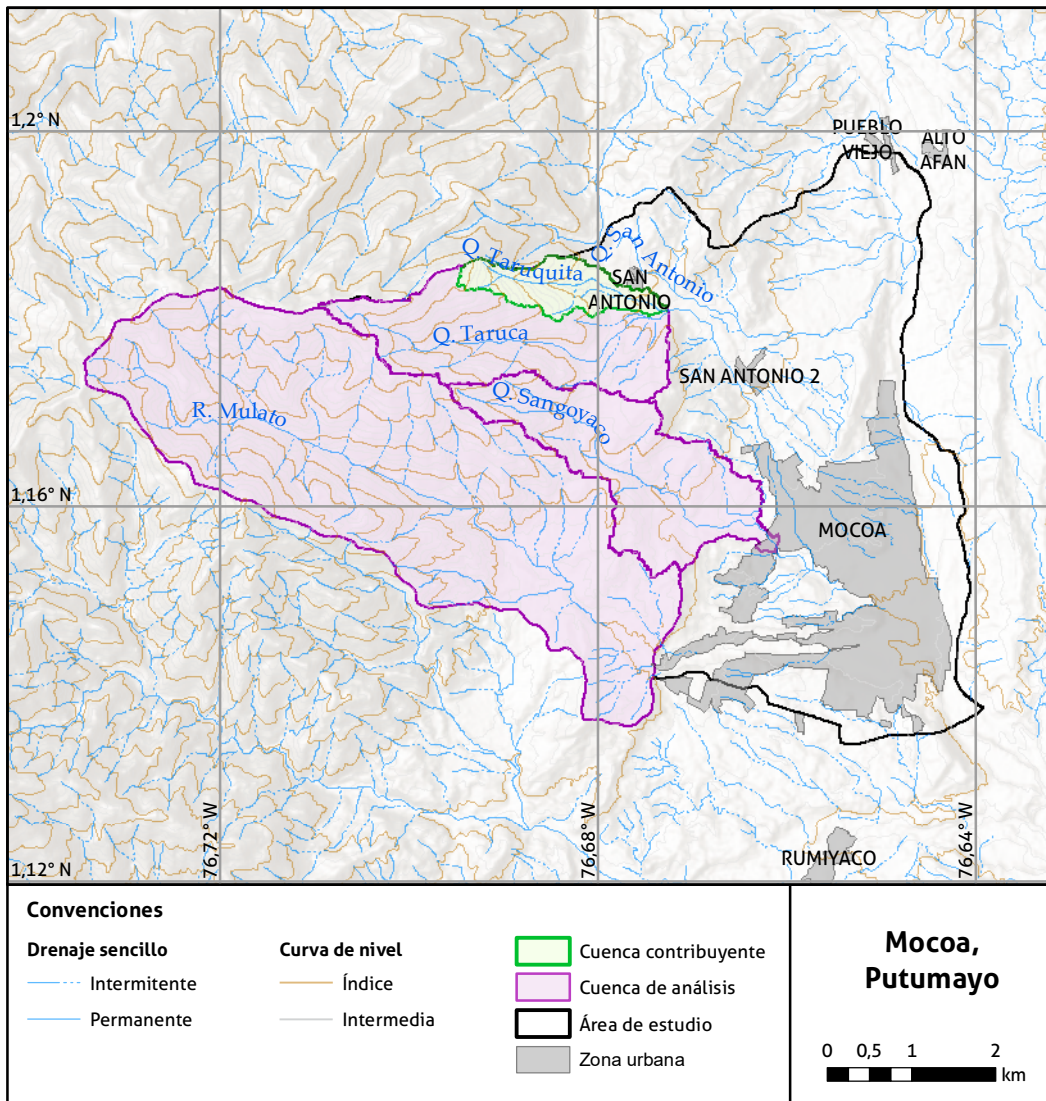
2.1. Escala de trabajo

Como ya se mencionó en el alcance, la definición de las escalas de trabajo se fundamenta en la relación existente entre clases de suelos y escalas establecidas en la Ley 388 de 1997. En consecuencia y dada la exigencia de evaluación de amenaza por avenidas torrenciales en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural de los municipios, presentados en el Decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Se propone evaluar la amenaza por avenidas torrenciales en una primera etapa a escala 1:25 000 en las zonas rurales aferentes al cauce en la parte alta, con el fin de identificar áreas en las cuáles se debe concentrar la evaluación detallada. En las zonas urbanas, de expansión urbana que interceptan áreas categorizadas en amenaza media y alta a escala 1:25 000, se propone evaluar la amenaza a escala 1:2000. Lo anterior permite representar el comportamiento del proceso de avenida torrencial, que comienza con la precipitación que cae sobre las laderas y los cauces en la parte alta de la cuenca; ésta ocasiona desprendimiento de material sólido por erosión y deslizamientos, caídas de rocas y flujos que se mezclan con el

agua de escorrentía, transitan por el cauce arrastrando material del lecho y de las márgenes hasta depositarse en una zona plana. Con base en lo anterior, es necesario evaluar el proceso a nivel de cuenca, subcuenca o microcuenca, en la zona aferente al cauce desde su nacimiento hasta la zona de depósito o llanura de inundación, abordando zonas rurales, urbanas y de expansión urbana.

2.2. Área de estudio para la evaluación a escala 1:25 000

El Decreto 1077 de 2015, en su artículo 2.2.2.1.3.2.1.3, establece que el área de estudio para evaluación de amenaza por avenidas torrenciales debe involucrar “todos los cauces presentes o con influencia en el municipio [...], que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial”. Además, el área de estudio para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000 debe ser definida con base en el inventario histórico de avenidas torrenciales, la geomorfología indicativa de zonas de depósito de origen fluviotorrencial y la localización de cascos urbanos y centros poblados, junto con las prioridades particulares que tenga cada administración municipal. Ya que las avenidas torrenciales son eventos que se dan lugar en el marco de una cuenca hidrográfica, el área de estudio debe estar constituida por la cuenca o cuencas que han presentado avenidas torrenciales en la historia geológica reciente, sus respectivas zonas de depósito y los centros poblados o cascos urbanos que se encuentren dentro de ese contexto fluviotorrencial (figura 3).



» **Figura 3.** Esquema del área de estudio a escala 1:25 000 y las cuencas que la constituyen, municipio de Mocoa, Putumayo

La definición del área de estudio resulta fundamental para dimensionar la extensión de los insumos requeridos para la aplicación de la metodología, particularmente, el área de cubrimiento del modelo digital de elevación (MDE), el cual debe cubrir como mínimo el 97 % del área de estudio definida, siempre y cuando no se afecte la representación de hidrografía, vías y zonas de cambio de pendiente, de conformidad con el criterio de totalidad definido en la Resolución 471 de 2020 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Dentro del área de estudio a escala 1:25 000 existen zonas que deben delimitarse para diferentes análisis intermedios, entre estas se encuentran la cuenca de análisis y la cuenca contribuyente que se describen a continuación.

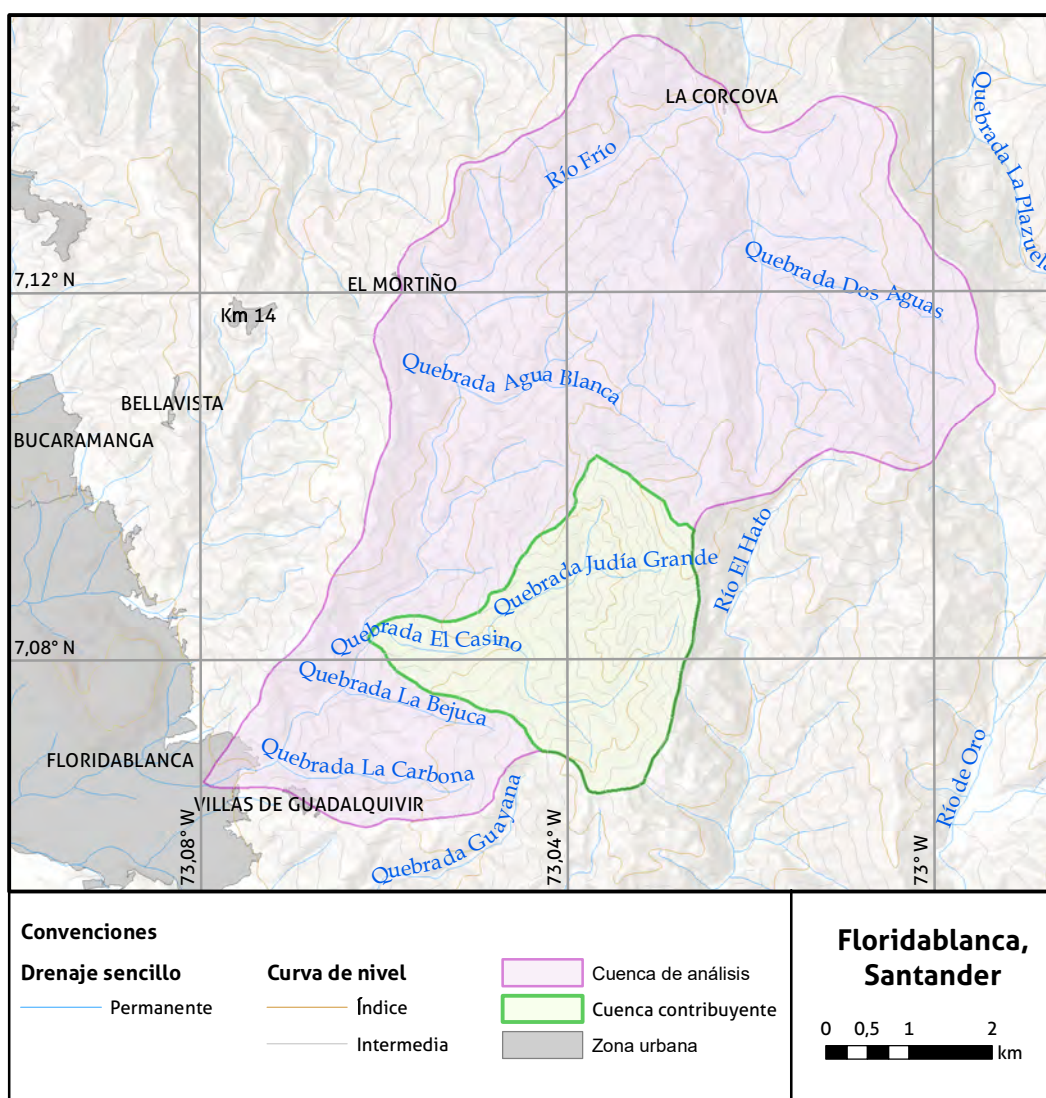
2.2.1. Cuenca de análisis

A las cuencas que forman parte del área de estudio se les debe calcular los índices morfométricos, con el fin de caracterizar el tipo de flujo predominante e identificar puntos anómalos que puedan indicar cambios abruptos de gradiente o

acumulación representativa de sedimentos en el canal. Para definir el límite de este tipo de cuenca se debe tener en cuenta que los índices recomendados en el presente documento están dirigidos al análisis morfométrico de la zona de captación, o *catchment*, donde ocurren las fases de iniciación y transporte de una avenida torrencial. En este sentido, la cuenca de análisis debe delimitarse a partir del punto donde el gradiente del canal cambia tan abruptamente que da lugar al desarrollo de una zona de depósito. El ejemplo más claro se presenta en los frentes de montaña domi-

nados por la producción de sedimentos, donde el cambio abrupto de gradiente y la pérdida de confinamiento dan paso a la formación de abanicos de estilo agradacional. En este caso, la cuenca de análisis inicia en el ápice del abanico (figura 4).

Por otra parte, la cuenca de análisis siempre va a estar definida por el punto de inicio del depósito independientemente de su edad relativa, como en el caso de los abanicos en progradación donde el ápice del abanico subreciente o antiguo es el que define el límite inferior de la cuenca de análisis, aunque este no coincida con el ápice del



» **Figura 4.** Cuenca de análisis que abarca el área de captación del río Frío en el municipio de Floridablanca, Santander

abanico reciente. Como los depósitos de origen fluviotorrencial pueden presentar otras geofor-
mas además de abanicos (anexo 3), otro crite-
rio complementario para la delimitación de la
cuenca de análisis es la localización de la zona
afectada por la acumulación de sedimentos de
avenidas torrenciales recientes o, en su defecto,
la localización del centro poblado que se en-
cuentre en la zona de tránsito.

En caso de que exista más de un centro po-
blado a lo largo de la zona de tránsito, se reco-
mienda que se delimite una cuenca de flujo pre-
dominante por cada uno de los centros poblados
para corroborar posteriormente con los resulta-
dos de índices morfométricos, las subunidades
geomorfológicas y evidencias de campo, cuál
tipo de flujo puede ser el más recurrente en cada
centro poblado.

2.2.2. Cuenca o zona contribuyente

La cuenca o zona contribuyente es aquella que,
debido a su alta densidad de procesos morfodi-
námicos identificados en el análisis multitempo-
ral de movimientos en masa y en el inventario
de avenidas torrenciales, es considerada rele-
vante en la producción de sedimentos y aporte
volumétrico a eventos tipo flujo, está contenida
dentro de la cuenca de análisis (figura 4).

2.3. Área de estudio para la evaluación a escala 1:2000

El área de estudio para la zonificación de amena-
za a escala 1:2000 debe incluir los suelos urbanos
y de expansión urbana, las zonas categorizadas en
amenaza alta y media producto de la evaluación
a escala 1:25 000, y sectores en los que geomorfo-
lógicamente se identifican depósitos de eventos
fluviotorrenciales recientes y las zonas aferentes
al cauce desde su nacimiento, específicamente
los tramos identificados donde se presente trans-
porte y arrastre de material asociados a puntos
de interés o de erosión de la sección 3.3.7. (figura
5). Lo anterior, de acuerdo con el Decreto 1077
de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Te-
rritorio en su artículo 2.2.2.1.3.1.3, que estable-
ce que “se deben elaborar estudios en los suelos
urbanos, de expansión urbana y rural para los

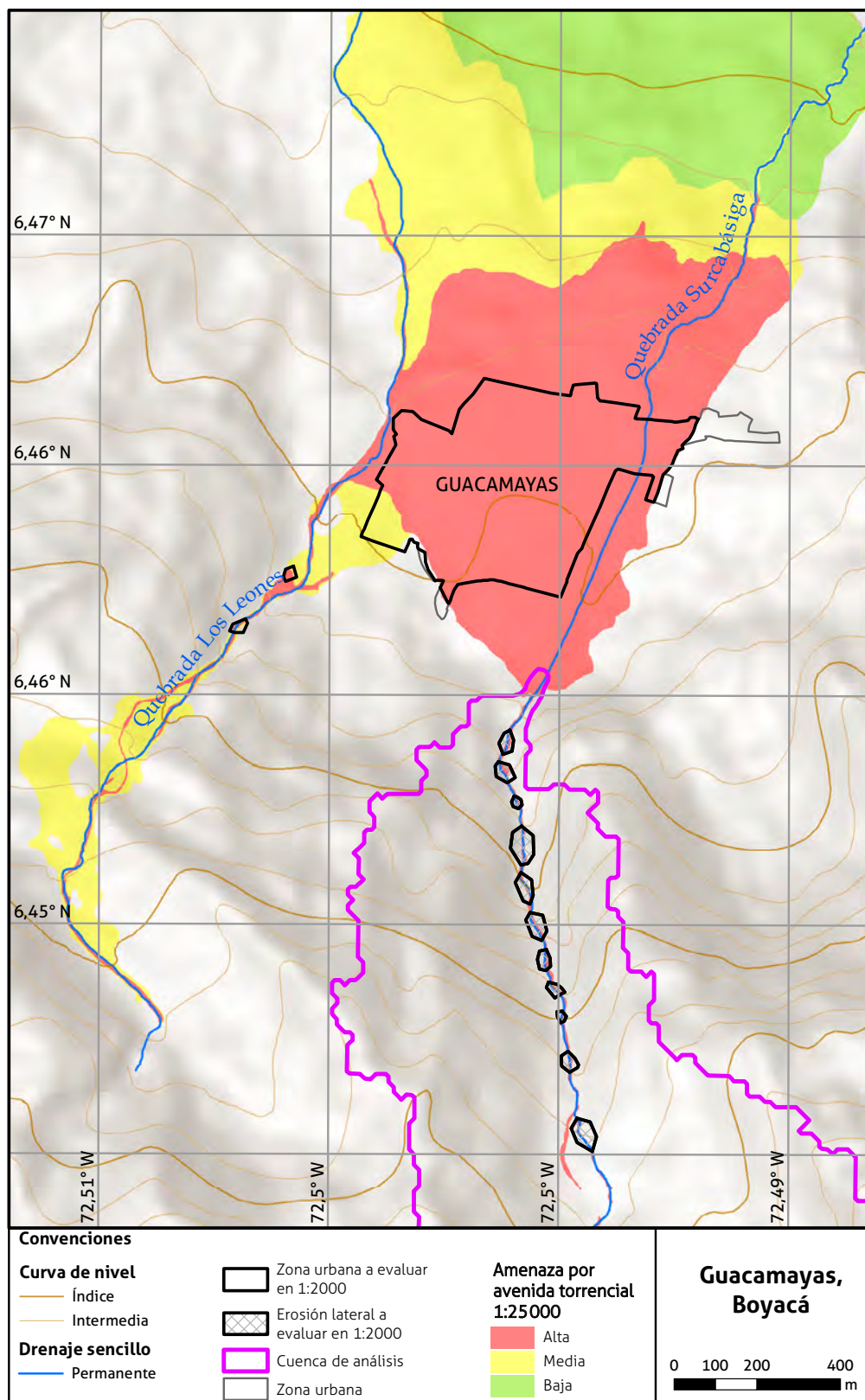
fenómenos de inundación, avenidas torrenciales
y movimientos en masa”, atendiendo la relación
entre clases de suelos y escalas establecidas en
la Ley 388 de 1997 y considerando el parágrafo
2 del artículo 2.2.2.1.3.1.5 del Decreto 1077 de
2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Te-
rritorio, en el que se menciona: “Aquellos mu-
nicipios o distritos 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
los estudios básicos como mínimo a escala 1:5000”.

2.4. Cartografía base

La cartografía básica es aquella que se obtiene
por procesos directos de observación y medi-
ción de los rasgos naturales y topográficos de
la superficie terrestre. Se denomina *cartografía
base* porque constituye el punto de partida y de
referencia para todos los estudios que involucren
elementos o fenómenos del mundo real asocia-
dos a una localización espacial y temporal. Estos
elementos geográficos pueden ser representa-
dos gráficamente por medio de símbolos como
puntos, líneas y polígonos (IGAC, 2016)

Para facilitar la comprensión de la infor-
mación geográfica, el almacenamiento, la inte-
gración e interacción con otros productos car-
tográficos, es necesario adoptar estándares de
información geográfica que permitan este pro-
pósito, de conformidad con las especificaciones
técnicas mínimas que deben tener los productos
de la cartografía básica oficial de Colombia (Re-
solución 471 de 2020 del IGAC y aquellas que la
modifiquen).

Dado que se propone abordar dos escalas de
análisis, es necesario estructurar la información
de cartografía base en los modelos de datos co-
rrespondientes a las escalas 1:2000 y 1:25 000
de conformidad con lo definido en las especi-
ficaciones técnicas (Resolución 529 de 2020 del
IGAC y aquellas que la modifiquen), donde es
importante tener claro que la zonificación de
amenaza por avenidas torrenciales se representa
sobre la cartografía a escala 1:2000 en las zonas
urbanas, suburbanas y de expansión urbana.



» **Figura 5.** Esquema del área de estudio a escala 1:2000. Municipio de Guacamayas, Boyacá

» **Tabla 1.** Parámetros de la proyección

Parámetro	Valor
Proyección	Transversa de Mercator
Elipsoide	GRS80
Origen: latitud	4°N
Origen: longitud	73°W
Falso este	5 000 000
Falso norte	2 000 000
Unidades	Metros
Factor de escala	0,9992

Fuente: Resolución 471/2020 del IGAC.

2.5. Sistema de referencia

Un sistema de referencia es el conjunto de convenciones y conceptos teóricos adecuadamente modelados que definen, en cualquier momento, la orientación, ubicación y escala de tres ejes coordenados (X, Y, Z) (Sánchez, 2004). Generalmente, el sistema de referencia horizontal (relacionado con la planimetría) está representado por los ejes X y Y, y el sistema de referencia vertical (relacionado con la altimetría) se representa con la Z, o componente vertical. La información geográfica generada en la zonificación y evaluación de amenaza a nivel de producto y de objetos geográficos debe estar referida a un sistema de referencia horizontal y vertical.

- » **Sistema de referencia horizontal:** el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia es el MAGNA-SIRGAS, y la proyección cartográfica será definida en un único origen de coordenadas, con los parámetros establecidos en la tabla 1.

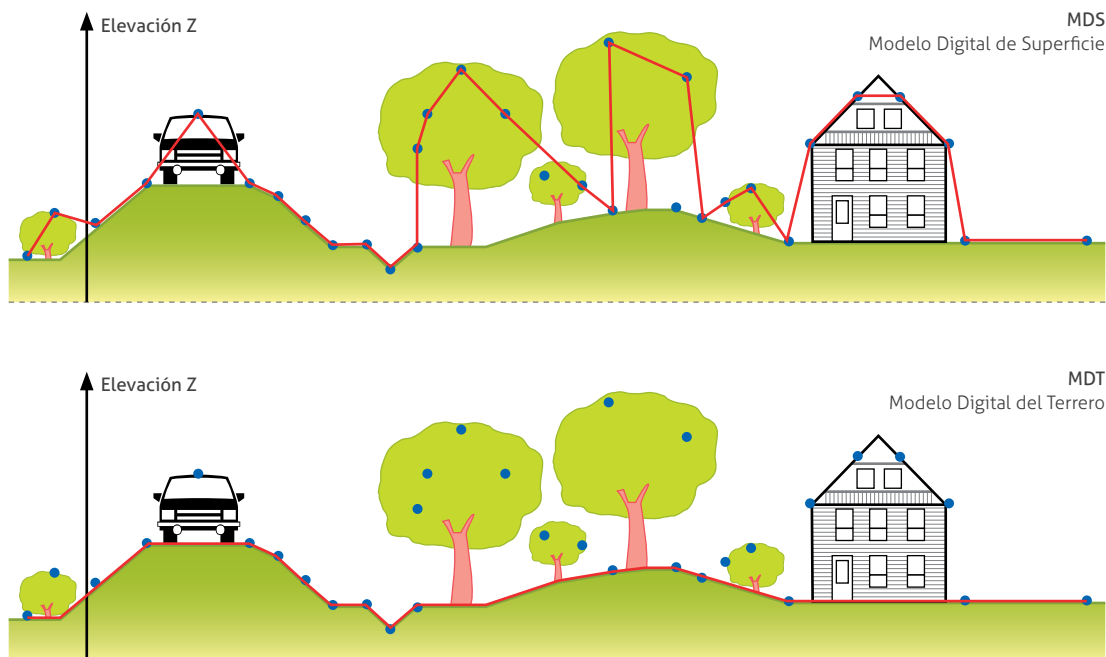
Es importante precisar que, de conformidad con la Resolución 529 de 2020, la proyección cartográfica aplica principalmente para el intercambio, uso y gestión de la información geográfica del país; por tanto, para efectos de actividades de posicionamiento no se restringe el uso de otras proyecciones a que haya lugar, toda vez que se realicen las conversiones correspondientes.

- » **Sistema de referencia vertical:** será el que tenga origen en el mareógrafo de Buenaventura.

2.6. Modelo digital de terreno (MDT)

Tanto en el contexto cotidiano como en la literatura científica resulta complejo distinguir las diferencias entre un modelo digital de elevación, modelo digital de terreno y un modelo digital de superficie; sin embargo, existen algunos elementos orientadores que aportan en la definición de estos conjuntos de datos:

- » **Modelo digital de elevación (MDE):** es un modelo de terreno *desnudo* que excluye árboles, edificios y otros elementos no correspondientes a la superficie terrestre (Zhou, 2017).
- » **Modelo digital de superficie (MDS):** es un modelo de elevación que incluye no solo datos de elevación del suelo, sino la parte superior de todos los elementos, incluidos los edificios y las copas de los árboles (Zhou, 2017).
- » **Modelo digital de terreno (MDT):** se define como una estructura de datos numéricos que representa la distribución espacial de los valores de altura de la superficie del terreno. Es un término genérico y más complejo que la elevación en tanto que puede contener otras características del paisaje. Por lo cual se puede entender al MDT como un conjunto ordenado de puntos muestrales que son una representación de información del terreno (elemento + variables del terreno) con una distribución espacial, por lo que se tiene X, Y y Z como la información del terreno de los grupos mencionados (Fallas, 2007; Li *et al.*, 2006; citado por Cumbe Loaiza y Roncancio Espinosa, 2017). Esto se puede observar en la figura 6.



» **Figura 6.** Diferencias entre un MDS y un MDT

Fuente: modificado de *Caribbean Handbook on Risk Information Management* (s. f.).

Se propone emplear el concepto genérico de MDT, para hacer referencia al conjunto de datos que describe valores de elevación tanto de la superficie terrestre (terreno, batimetrías) como de los elementos del paisaje artificializado (vías, edificaciones y otras construcciones: tanques de almacenamiento, canchas, estrechamiento/puentes) que condicionan el movimiento de los flujos modelados. Estos valores de elevación tienen un sistema de referencia horizontal y vertical, y la aproximación o modelado de la topografía real se hace por medio de un algoritmo de interpolación.

Existen distintos métodos y técnicas para capturar datos del terreno y consecuentemente generar un MDT. Los más generalizados se relacionan con el uso de instrumentos terrestres como teodolitos, niveles, estaciones totales o receptores GPS, uso de mapas topográficos existentes, métodos de fotogrametría, digitalización cartográfica, interferometría de radar y técnicas de escáner láser (LIDAR) (Shingare y Kale, 2013). Independiente del método de adquisición, para representar completamente la superficie del terreno (o cualquier otra), se debe establecer un modelo que pueda formar una superficie conti-

nuo, incluyendo la tercera dimensión, o 3D. Tres modelos de datos son comúnmente empleados para construir un MDT: celdas regulares, red triangular irregular (*triangulated irregular network [TIN]*) y líneas de contorno.

La construcción de un MDT siempre implica un grado de aproximación y generalización de la realidad que tiene implicaciones en sus productos derivados; adicionalmente a estos, las propiedades inherentes de los objetivos como la rugosidad del terreno, humedad, cobertura vegetal y las características de los instrumentos, entre otros, pueden generar limitaciones en estos conjuntos de datos. En este sentido y dada la necesidad de generar áreas de amenaza por avenidas torrenciales, es imprescindible identificar las debilidades y fortalezas de los modelos digitales de elevación a emplear, toda vez que la topografía constituye uno de los más importantes insumos a un modelo de flujo de detritos (Sodnik *et al.*, 2012) y determina en gran medida la hidráulica de la crecida modelada y la extensión del área inundada (Horritt y Bates, 2001; Nicholas y Walling, 1997).

El objetivo entonces radica en reducir las limitaciones de los MDT de tal manera que los

productos que deriven de este conjunto de datos se aproximen a la realidad de los procesos físicos que requieren ser modelados. Por esta razón, se propone un procedimiento para la revisión de los MDT (en caso de que se cuente con alguno) como para la construcción de este (en el evento de requerir la adquisición de este conjunto de datos).

2.6.1. Generalidades y objetivos de la propuesta de revisión y eventual ajuste de los MDT

Como referente para la revisión de los MDT (en caso de que se cuente con uno en el área de estudio), se propone una serie de pasos a seguir en el evento de requerirse ajustes para lograr una aproximación más cercana a la realidad y reducir las limitaciones de estos conjuntos de datos para los propósitos de la metodología. El proceso aquí descrito puede ser aplicado por analistas, consultores y comunidad académica en general, para satisfacer los requerimientos de análisis en las dos escalas de trabajo (1:25 000 y 1:2000).

En la escala 1:25 000, se emplea como referencia el modelo de acceso libre y cubrimiento nacional (ALOS PALSAR) sobre el cual se sugiere aplicar ciertos procedimientos de ajuste para que pueda ser utilizado con fines de modelación, en el marco del proceso de zonificación de avenidas torrenciales. En la escala 1:2000, se debe partir de un MDT conforme según las especificaciones técnicas para productos de cartografía básica oficial de Colombia definidos por el IGAC. Este MDT eventualmente podrá ser ajustado o editado cuando presente algún nivel de inconsistencia que pueda impactar los ejercicios de modelación y la generación de productos derivados.

Algunos elementos del paisaje representados de forma errónea en el MDT pueden impactar la generación de productos derivados; estas inconsistencias generalmente imperceptibles a simple vista y que suelen escapar a los controles de calidad cartográficos, pueden generar, por ejemplo, cambios en la dirección de flujo, condiciones de represamiento y desbordes laterales en estruc-

» **Tabla 2.** Elementos del paisaje natural y artificial a considerar para la revisión o construcción del MDT

Información	Escala	Lugar	Objetivo
Puntos de control	1:2000	Puntos distribuidos en el área de cubrimiento que no puede ser menor a 20 puntos de chequeo (Resolución 471/2020 y aquellas que la sustituyan o modifiquen).	Evaluación de la calidad del MDT y asignar un sistema de referencia a los elementos levantados en esta tabla.
Intersecciones viales	1:2000	Casco urbano.	Verificar o ajustar las direcciones de flujo en el área urbana, mejorar los perfiles viales en el evento que el MDT existente presente inconsistencias por este concepto.
Construcciones-edificaciones	1:2000	Canchas, tanques de almacenamiento, área construida, edificios si es posible.	Incorporar en el MDT la cota estimada de las construcciones en el evento de que el modelo existente sea estrictamente de terreno.
Secciones transversales 1:2000	1:2000	Canal(es) o cauce(s) en el casco urbano y de expansión, se sugiere levantar secciones cada 10 m sobre el canal(es) o drenaje(s). Las secciones transversales deben reflejarse cada 5 m en zonas de cambio de dirección o meándricas.	Mejorar y detallar los cauces a modelar en el evento que el MDT existente no represente de manera adecuada estos elementos.
Diques o estructuras de contención	1:2000	Detallar zonas de la estructura en las que se pueda evidenciar condiciones de falla o rompederos.	Identificar posibles condiciones de falla y eventuales efectos de rompimiento en la modelación.
Puentes, alcantarillas, <i>BoxCulvert</i>	1:2000- 1:25 000	Tramos de los drenajes en los que se evidencien puentes, alcantarillas o estructuras que en el MDT restrinjan el flujo natural de los drenajes.	Identificar la cota del terreno por debajo de la estructura o la cota a la entrada y salida de esta. Se busca con esto mejorar las direcciones de flujo y evitar en el MDT condiciones de represamiento.
Secciones transversales 1:25 000, mínimo 3 puntos (ribera o línea de árboles y <i>Talweg</i>)	1:25 000	Desde donde termina el cubrimiento de la escala 1:2000 hacia aguas arriba de la cuenca(s) de análisis por el cauce principal (hasta donde las condiciones topográficas lo permitan, mínimo 3 km).	Tener un referente que permita encauzar los drenajes en la escala 1:25 000, y empalmar con el MDT en la escala 1:2000.
Gradiente longitudinal	1:25 000	Cambios abruptos de pendiente en la escala 1:25 000.	Ajustar el modelo ALOS PALSAR en zonas de alta pendiente.

turas de contención, lo que podría subestimar o sobreestimar las alturas y velocidades de una avenida torrencial. Una manera de reducir estas limitaciones es revisar si los elementos condicionantes en el comportamiento de los flujos se encuentran adecuadamente representados. En la tabla 3 se sugieren algunas zonas de particular interés que el MDT debe representar para ambas escalas de análisis.

Si en el área de estudio no se cuenta con un MDT para su proceso de adquisición y construcción, se debe hacer énfasis en la necesidad de que dicho modelo cumpla con las especificaciones técnicas (Resolución 471 de 2020 del IGAC) y que además pueda representar adecuadamente lo definido en la tabla 2.

Para la validación y oficialización de los productos cartográficos resulta necesario acogerse a lo establecido en las especificaciones técnicas del IGAC (Resolución 471 de 2020). Este proceso aplica para los productos finales de cartografía básica oficial: ortoimágenes, modelos digitales de terreno y base de datos cartográfica vectorial.

2.6.1.1. Proceso metodológico de ajuste de modelos digitales de terreno en la escala 1:25 000

El proceso metodológico presume que, con los procesos representados en la figura 7, es posible alcanzar los requerimientos del MDT para modelación y zonificación de avenidas torrenciales en la escala 1:25 000. En esta escala de análisis se busca principalmente garantizar el correcto gradiente altitudinal de los cauces principales en el área de estudio; los procesos aplican tanto para un MDT conforme, como para un modelo de libre acceso, como el ALOS PALSAR.

El primer proceso consiste en la revisión y consolidación de la información cartográfica disponible, que podrá ser de utilidad tanto para la revisión del MDT como para una eventual edición basada en objetos, que entre otros corresponde a curvas de nivel a escala 1:25 000 o más detalladas, ortofotos, mapas base, cartografía básica, entre otras.

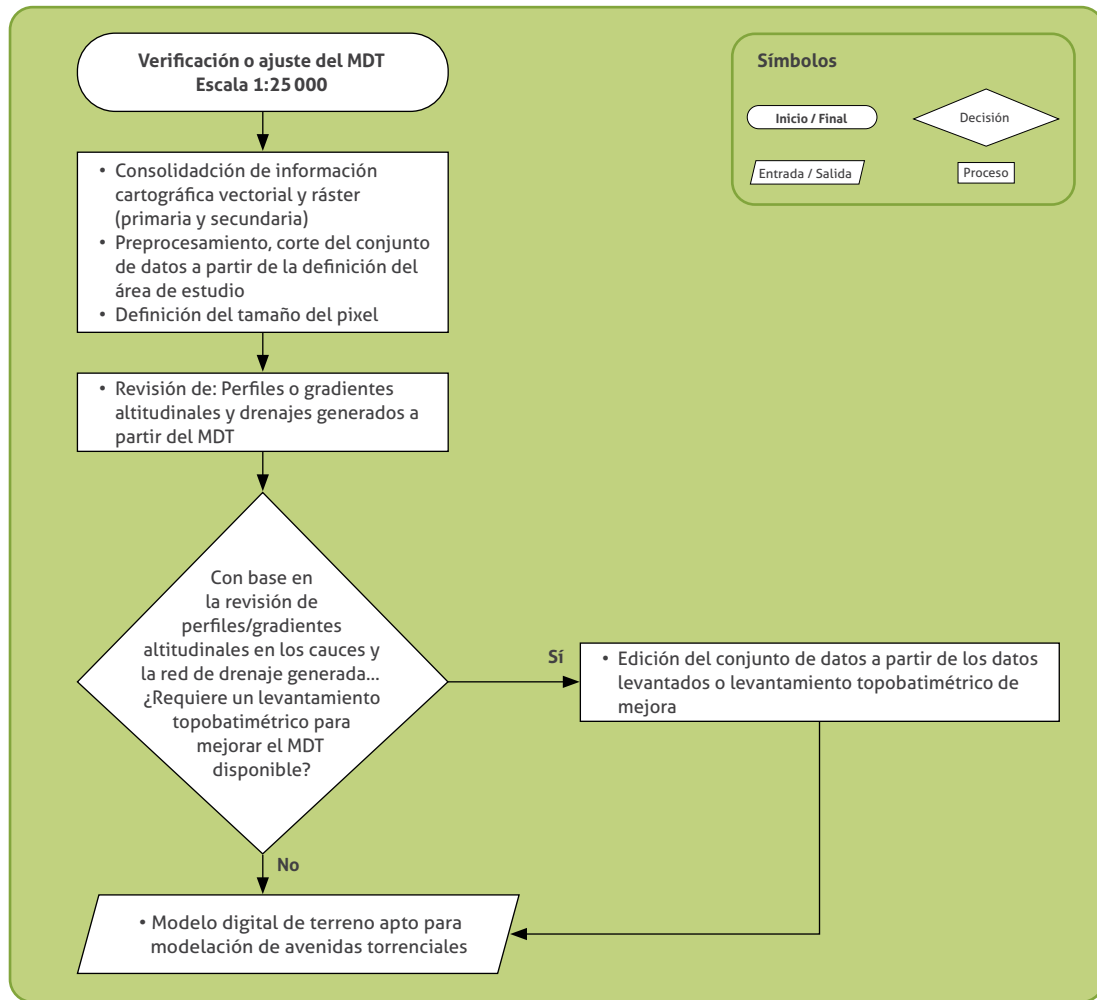
A partir del área de estudio definida (cuencas contribuyentes + cuencas de análisis + casco urbano), se debe proceder con el preprocesamiento del MDT, el cual consiste en las activida-

des de selección, descarga, unión, reproyección y posterior corte para el área de estudio.

El siguiente proceso consiste en definir el tamaño del pixel del MDT, lo que estará en función principalmente del ancho de los drenajes en los que transitan los flujos y las implicaciones que tenga este tamaño de celda en términos de costo computacional —menor tamaño de celda implica más tiempo computacional para las simulaciones—. Para la escala 1:25 000 y teniendo en cuenta las características de los drenajes en terrenos quebrados —susceptibles a ser mejorados con levantamientos topobatimétricos o información existente—, se recomienda un tamaño de pixel menor a 2 m, esto es básicamente porque al emplear el tamaño de celda de 12,5 m del modelo ALOS PALSAR no se estaría capturando la variabilidad de una sección transversal de los drenajes, lo que tendría efectos importantes en la generación de los productos derivados del MDT; para alcanzar esta resolución espacial, es necesario realizar la reducción del tamaño de celda a través de técnicas de remuestreo con algoritmos disponibles en sistemas de información geográfica. Lo anterior, condicionado a los requerimientos del dominio computacional utilizado en la modelación de cada proyecto o según el criterio de modelación del experto.

Dado que este proceso busca garantizar que el MDT represente de manera correcta los gradientes altitudinales a lo largo de los cauces principales, es necesario revisar estos perfiles a lo largo de cada drenaje cartografiado; asimismo, es recomendable delimitar cuencas y generar drenajes a partir del MDT para comparar si estos corresponden con la cartografía. Si en este proceso se identifican datos de elevación anómalos (*outliers*) en el perfil altitudinal de los drenajes principales, o se evidencia la no correspondencia de los drenajes generados con la cartografía de referencia, el analista de sistemas de información geográfica (SIG) debe emplear otros conjuntos de datos existentes para corregirlos (p. ej., curvas de nivel) o evaluar la necesidad de un levantamiento topobatimétrico de mejora, el cual debe contemplar como mínimo lo sugerido en la tabla 2.

Con la información disponible o el levantamiento topobatimétrico de mejora, se procede

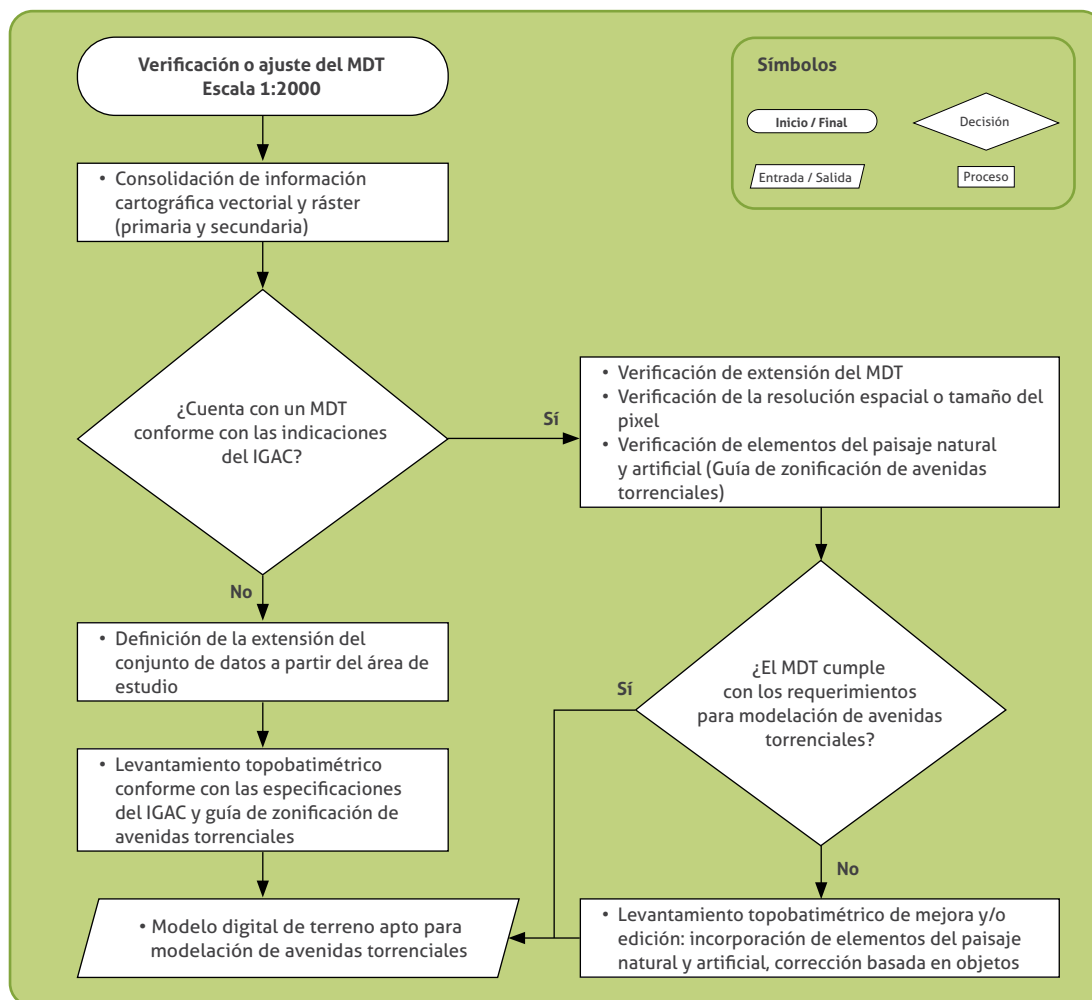


» **Figura 7.** Flujo de trabajo para el ajuste o verificación del modelo digital de elevaciones en la escala 1:25 000

con la corrección o ajuste del MDT, cuyo objetivo en esta escala es asignar al MDT la tendencia de las curvas de nivel obtenidas de la cartografía básica del IGAC a escala 1:25 000 o cualquier otra fuente. Gemitzi y Christou (2013) desarrollaron el concepto LAN (*line attribute network*), el cual consiste en aumentar la densificación de puntos de altura en zonas donde los procesos de interpolación generan errores, como los lechos de ríos. El método se basa en una asignación automática de valores de altura a la red de drenaje, en los puntos de intersección entre las líneas de drenaje y las curvas de nivel, y también interpolando puntos intermedios (Burgos y Salcedo, 2014). Este principio puede ser implementado

haciendo uso de SIG y permite corregir las alturas anómalas a lo largo de los cauces, lo que a su vez facilitará que los drenajes derivados con el MDT sean consistentes con la cartografía de referencia.

Los procesos de revisión y ajuste deben ser iterativos, lo que implica que, en el tiempo estimado para estas actividades, se compare el modelo crudo con el editado; esto ayudará al analista identificar zonas por mejorar o complementar mediante levantamientos topobatómétricos convencionales. El proceso de edición del MDT en la escala 1:25 000 culmina con un archivo tipo *raster* con resolución espacial 1 m o menos (remuestreado según características de



» **Figura 8.** Procedimiento y flujo de trabajo para el ajuste o verificación del modelo digital de terreno en la escala 1:2000

los drenajes). Este producto debe representar las secciones transversales y demás elementos del levantamiento en la escala 1:25 000 (tabla 2), debe tener los valores de altura corregidos a lo largo del (de los) cauce(s) principal(es) y ser consistente con los drenajes de la cartografía.

2.6.1.2. Proceso metodológico de ajuste de modelos digitales de terreno en la escala 1:2000

El proceso metodológico sugerido para el ajuste del modelo en la escala 1:2000 parte de un MDT que debe cumplir con las especificaciones técnicas mínimas de los productos de cartografía básica oficial de Colombia. Para la revisión,

construcción o eventual edición de este conjunto de datos se sugiere seguir el esquema detallado en la figura 8.

El primer paso del proceso consiste en la revisión y consolidación de la información cartográfica disponible para la escala 1:2000. Es pertinente indagar sobre levantamientos topográficos existentes en el área urbana, puntos de la red geodésica, cartografía urbana de la actualización catastral, información vectorial del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, ordenamiento territorial, entre otros.

Si en el área de estudio para la escala 1:2000 no se cuenta con modelos digitales de terreno conforme a las especificaciones cartográficas del

IGAC, es necesario representar en un archivo vectorial tipo polígono el área en la que se debe adquirir el MDT y la cartografía básica. En los procesos de adquisición de estos productos cartográficos, se debe enfatizar en el cumplimiento de las especificaciones técnicas del IGAC y la consideración de los elementos mínimos requeridos para la aplicación de la metodología en la escala 1:2000 (tabla 2). En el evento de que exista un MDT conforme a especificaciones técnicas del IGAC, hay que verificar que el cubrimiento de este conjunto de datos sobre el polígono del área de estudio a escala 1:2000 sea como mínimo del 97 %.

Si el nivel de cubrimiento es satisfactorio, se procede al siguiente paso, que consiste en la verificación de la resolución espacial o tamaño del pixel del MDT con el propósito de definir si se realiza reducción del tamaño de pixel (debe ser siempre inferior a 1 m). Esta decisión está en función del área mínima cartografiable y del ancho del canal o drenaje a modelar, así como las implicaciones del remuestreo en términos de costo computacional en las modelaciones.

Para mayor claridad, si el drenaje urbano presenta una sección transversal de ancho promedio de 1 m y el MDT existente tiene 1 m de resolución espacial, resultará necesario reducir el tamaño de pixel para representar con mejor detalle una sección transversal de dicho drenaje. Este proceso implica mayor volumen de almacenamiento y por tanto mayor costo computacional para analizar el conjunto de datos.

Definido el tamaño de pixel, se debe verificar que el MDT contenga como mínimo los elementos del paisaje natural y artificial relacionado en la sección 2.6.1. Si en este punto del proceso, el conjunto de datos cumple con los requerimientos mínimos descritos en esta guía, se considera apto para los fines de modelación fluidodinámica. Si, por el contrario, el MDT no cumple con los requerimientos sugeridos, se recomienda adelantar un levantamiento topobatómico de mejora y posteriormente incluir al MDT existente estos datos. Este levantamiento puede realizarse con instrumentos convencionales de bajo costo, como estaciones totales o equipos RTK (en lo posible evitar técnicas fotogramétricas), pero

siempre tomando como referencia los puntos de control que se emplearon para la elaboración del modelo existente (puntos de control definidos en el artículo 4 de la Resolución 471/2020).

Algunos elementos que se pueden incluir mediante edición al MDT son las secciones transversales de los cauces, estructuras de contención o diques, vías y edificaciones, elementos que pueden ser obtenidos directamente en campo o por información secundaria, como la derivada de las actualizaciones catastrales o de otros trabajos georreferenciados. Una suposición básica para la aplicación de estas técnicas se fundamenta en que los elementos representados vectorialmente contienen información implícita relacionada con la altura o la pendiente que resulta útil para complementar o incorporar información omitida y mejorar la representación vertical del MDT (Burgos y Salcedo, 2014).

El proceso de edición del MDT en la escala 1:2000 culmina en un archivo tipo *raster* con resolución espacial 1m o menos (según criterio del analista o modelador). Este producto debe ser conforme a las especificaciones técnicas del IGAC y considerar como mínimo los elementos relevantes para la escala 1:2000 (resolución 471 de 2020).

2.6.1.3. Consideraciones para la unión de los MDT 1:2000 y 1:25 000

Del proceso metodológico se derivan dos conjuntos de datos: el de la escala 1:2000 en el área urbana/expansión y el 1:25 000. En términos de modelación, se tienen dos opciones: a) que la modelación a escala 1:25 000 entregue resultados (sólidos y líquidos) a la escala 1:2000 y b) que se integren en un solo conjunto de datos los productos de ambas escalas. El primer caso implica que existan dos MDT que pueden tener diferentes resoluciones espaciales. En el segundo, se tendrá un solo MDT, por lo que se debe privilegiar la resolución espacial más fina entre ambos conjuntos de datos. Si se decide la segunda opción, se sugiere el uso del método *MBlend* como técnica de generación de mosaicos, dado el rendimiento que ha presentado para evaluación detallada de flujos urbanos (Leitão y de Sousa, 2018).

2.6.1.4. Consideraciones para la validación de los MDT

Los resultados derivados del proceso de modelación fluidodinámica y el conjunto de datos del inventario de avenidas torrenciales históricas pueden constituirse como elementos adicionales a los definidos por el IGAC (totalidad, exactitud absoluta de la posición y consistencia lógica) para la validación de los MDT. La coincidencia en la representación espacial de los flujos modelados y los polígonos por avenida torrencial del inventario refleja también la efectividad en el tratamiento que se ha dado a las elevaciones, se sugiere aplicar sobre las manchas simuladas el criterio de totalidad del que trata la Resolución 471 de 2020; es decir, comparar la extensión de la mancha simulada con la extensión del polígono de inventarios correspondiente como medida adicional de la efectividad de los procesos de ajuste del MDT.

2.7. Insumos requeridos de la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25 000

Entre los insumos básicos necesarios para llevar a cabo la aplicación de la presente metodología se encuentran los productos obtenidos de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017), específicamente los resultantes de la caracterización geoambiental (inventario de procesos morfodinámicos, geomorfología, geología, cobertura y uso de suelo) y la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.



Quebrada Surcabásiga
Guacamayas, Boyacá, 2021
Fotografía de Andrés Reyes



» Chaparral, Tolima
Fotografía de Andrés Reyes



3

Caracterización de avenidas torrenciales



Avenida torrencial de 2017
Quebrada Taruquita
Mocóa, Putumayo
Fotografía de Andrés Reyes

Como se mencionó de manera sucinta en el capítulo 1, la caracterización de avenidas torrenciales es la primera etapa en la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales (figura 2). El objetivo de esta etapa es reconstruir la historia fluviotorrencial del territorio a partir del inventario de avenidas torrenciales, las geoformas indicativas de depósitos y la caracterización de eventos recientes que constituyen dichas geoformas, así como identificar los elementos geomorfológicos y morfodinámicos que favorecen la ocurrencia de eventos fluviotorrenciales.

La caracterización de avenidas torrenciales está conformada por tres grandes etapas, como se muestra en la figura 9, donde se relacionan los procesos con sus respectivos productos, que son a su vez insumos de las demás etapas de la evaluación de la amenaza a escala 1:25 000. Por ejemplo, el volumen de sedimentos por unidad de modelación definido principalmente en el trabajo de campo es posteriormente comparado con el volumen estimado a partir de la aproximación geométrica como se verá en la sección 5.1. Asimismo, la caracterización de los eventos que constituyen las geoformas indicativas de depósitos fluviotorrenciales, además de ahondar en la reconstrucción de la historia fluviotorrencial, permite obtener el D90 y el Dmax necesarios para la cuantificación de la amenaza a escala 1:25 000. Por otra parte, los puntos de interés y el análisis multitemporal de movimientos en masa forman parte de la definición de los posibles puntos donde pueden ocurrir represamientos, los cuales son tenidos en cuenta en el análisis de otros escenarios (capítulo 7). Y, por último, la zonificación de susceptibilidad geomorfológica por avenidas torrenciales a partir de la geomorfología indicativa es integrada con la cuantificación de amenaza escala 1:25 000 (sección 5.4.).

Como se observa, los productos generados en la caracterización de avenidas torrenciales definen parte de los factores condicionantes tenidos en cuenta en la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000, por tal motivo es considerada una etapa clave en el proceso de zonificación.

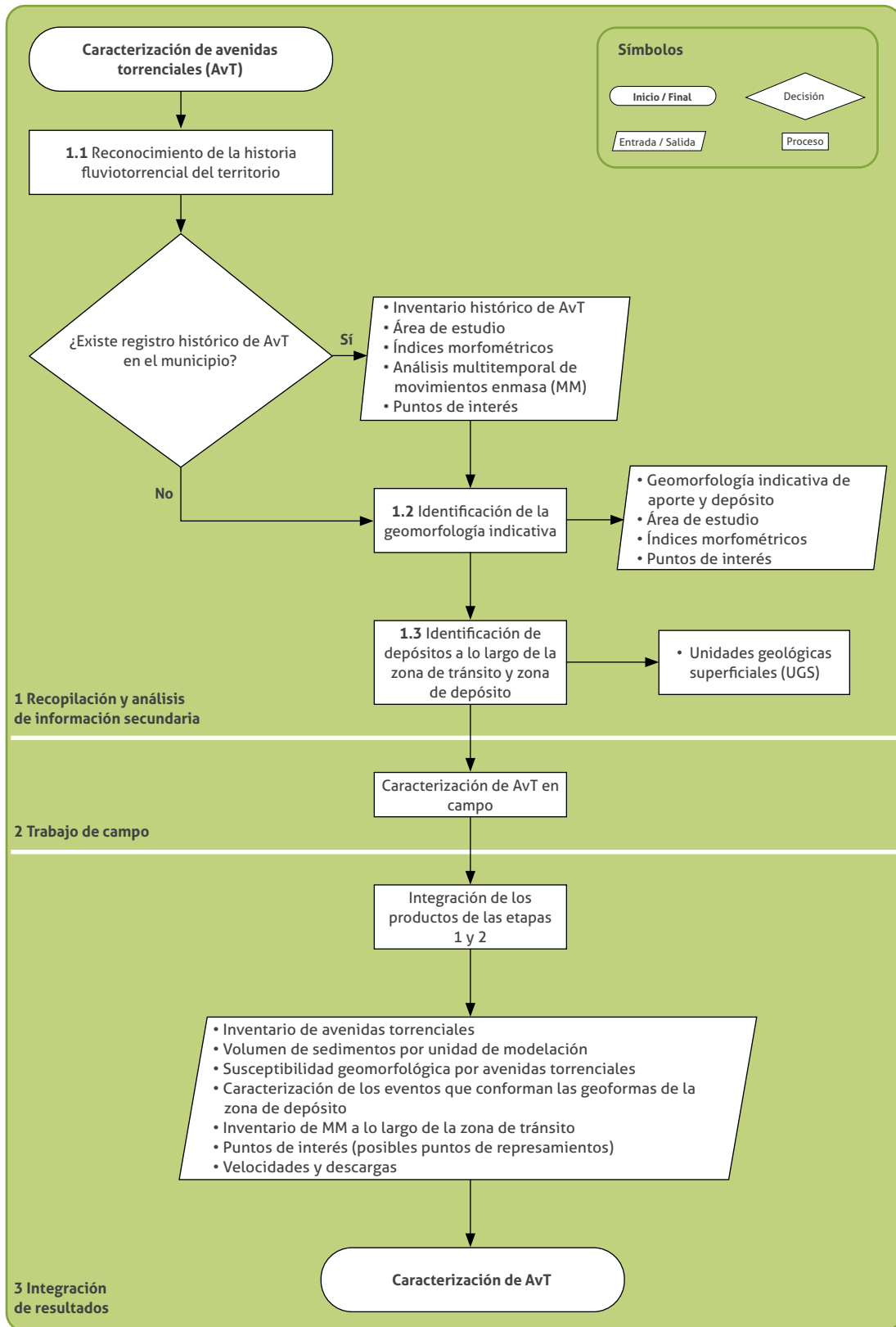
3.1. Fuentes de información e insumos para la caracterización de avenidas torrenciales

Conocer los procesos naturales que han afectado a una región a lo largo de la historia es fundamental para iniciar una evaluación de amenaza. En el caso de las avenidas torrenciales, el reconocimiento del territorio y la identificación de los afluentes que han presentado este tipo de procesos son de vital importancia. Esto permite evaluar el futuro comportamiento de los flujos a partir de características como el tipo de material transportado, recurrencias, magnitudes, el contexto meteorológico en el que se han generado, etc. Para este fin se debe realizar la búsqueda exhaustiva de eventos fluviotorrenciales que hayan ocurrido y de los cuales exista registro histórico y geológico.

3.1.1. Información secundaria de entidades públicas y medios de comunicación

Entre las fuentes de información de carácter público más comunes se encuentran las enlistadas en la tabla 3.

Existen otras fuentes de información que también aportan significativamente al conocimiento de la dinámica fluviotorrencial del territorio, como artículos científicos, tesis, simposios,



» **Figura 9.** Flujo de trabajo y procedimiento para la caracterización de avenidas torrenciales

» **Tabla 3.** Fuentes de información de carácter público

Entidad	Fuente de información vía web
Servicio Geológico Colombiano (SGC)	Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)
	Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG)
	Sismicidad Histórica de Colombia (SISH)
Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD)	Consolidado anual de emergencias
Municipios	Planes y Esquemas de Ordenamiento Territorial (POT, EOT)
Corporaciones	Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS)
	Bases de datos y/o informes de las Corporaciones Autónomas Regionales

bases de datos de organizaciones no gubernamentales, el Monitor Humanitario Colombia de la Oficina de Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA), videos, entre otras. De igual manera, entre las fuentes de información secundaria más relevantes se encuentran los medios de comunicación y la narrativa audiovisual creada por los mismos habitantes de las regiones que pueden dar cuenta de la magnitud de los eventos y su recurrencia.

3.1.2. Fotografías aéreas y sensores remotos

Como parte del reconocimiento histórico de las avenidas torrenciales que han afectado a una región a lo largo de su historia (figura 9), se debe elaborar el inventario de avenidas torrenciales y el análisis multitemporal de movimientos en masa. Para ello, los insumos comúnmente utilizados se pueden encontrar de forma análoga o digital, incluyendo fotografías aéreas, imágenes satelitales de alta resolución, mapas de sombras derivados de modelos digitales de elevación satelitales y modelos tridimensionales del terreno generados a partir de información LiDAR (Rodríguez *et al.*, 2017). De igual manera, los sensores remotos más utilizados en el marco de las geoamenazas, y específicamente en la cartografía de avenidas torrenciales se encuentran: Landsat, SPOT, Sentinel, IKONOS, InSAR, LiDAR, ENVISAT & ERS, GEOSAR, Orbview y GeoEye (Elkadiri *et al.*, 2014; García-Delgado, Villamizar-Escalante *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2013; Méndez *et al.*, 2016; Rogelis y Werner, 2014; Scaioni *et al.*, 2014; Schneider *et al.*, 2015; Schneuwly *et al.*, 2013). En la tabla 4 se hace referencia a algunos de esos sensores y los enlaces donde se pueden obtener imágenes satelitales según la cobertura de los sensores en el área

de estudio. Otra fuente usada son las imágenes Landsat de mediana resolución de Google Earth, de la cual también se puede obtener información espacial de diferentes fechas según la cobertura que se tenga en la cuenca de interés. Por otra parte, el IGAC posee una base de datos de fotografías aéreas que puede ser consultada desde su portal web (<https://geoportal.igac.gov.co/>) como desde el Banco Nacional de Imágenes (<http://bni.gov.co:81/home/srv/es/main.búsqueda>).

Se recomienda la implementación de imágenes de alta resolución (Rodríguez *et al.*, 2017), según la disponibilidad de información del municipio, con el fin de obtener el mayor detalle al generar la cartografía de los elementos que forman parte de una avenida torrencial (cuencas o zonas contribuyentes de sedimentos, procesos morfodinámicos, zona de tránsito y zona de depósito). Así mismo, se recomienda el uso de estas imágenes junto con modelos digitales de elevación de la mejor resolución disponible para la generación de la geomorfología indicativa.

3.1.3. Productos de la Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000 utilizados en la caracterización de avenidas torrenciales

De la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25 000 generada a partir de la guía metodológica del SGC (Rodríguez *et al.*, 2017), los siguientes productos son necesarios para el desarrollo de la caracterización de avenidas torrenciales:

- » Inventario de procesos morfodinámicos:
 - Movimientos en masa y erosión superficial.

» **Tabla 4.** Listado de sensores remotos recomendados para la generación de capas temáticas

Misión/Sensor	Subtipo	Grado de procesamiento	Tiempo de adquisición	Resolución (m)	URL
Landsat	L8	C1 - Level 1	2013 - Presente	30	https://earthexplorer.usgs.gov/
	L7 ETM+		1999 - Presente	30, 15	
	L4-L5 TM		1982 - 2012	30	
	L1-5 MSS		1972 - 1992	60	
ASTER - NASA	ASTER	Level 1T	2000 - Presente	15	
Sentinel	Sentinel 2	Level 1C	2015 - Presente	30, 20, 10	
Sentinel	Sentinel 2	Level 1C - Level 2A		30, 20, 10	https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home
ALOS	AVNIR-2	-	2006 - 2011	10	https://search.asf.alaska.edu/#/

» Factores condicionantes:

- Geomorfología y geología, equivalentes a las subunidades geomorfológicas con sus respectivos rasgos geomorfológicos y las unidades geológicas superficiales, respectivamente.
- Cobertura y uso del suelo.

3.2. Procedimiento para la caracterización de avenidas torrenciales

La caracterización de avenidas torrenciales está conformada por tres etapas como se muestra en la figura 9: (1) recopilación y análisis de información secundaria, (2) trabajo de campo y (3) integración de resultados. La primera está constituida a su vez por tres subetapas que se centran en reconocer la historia fluviotorrencial del territorio, identificar las geoformas indicativas de aporte y depósito, e identificar aquellos materiales que las constituyen. La segunda corresponde al trabajo de campo con el cual se busca corroborar y completar el análisis hecho a partir de información secundaria. Y, por último, la integración de los resultados, la cual abarca un análisis integral del inventario de avenidas torrenciales, los eventos registrados en las geoformas indicativas de depósito, y los elementos geomorfológicos y morfodinámicos cuya interacción favorecen la ocurrencia de un evento fluviotorrencial.

A continuación, son descritas cada una de las fases de la caracterización de avenidas torrenciales y sus productos relacionados en la figura 9.

3.2.1. Recopilación y análisis de información secundaria

Esta etapa de la caracterización de avenidas torrenciales está conformada a su vez por tres subetapas (figura 9), cuyos insumos necesarios para llevarla a cabo se encuentran descritos en la sección 3.1.

3.2.1.1. Reconocimiento de la historia fluviotorrencial del territorio

El reconocimiento de la historia fluviotorrencial inicia con la búsqueda de información secundaria (figura 10) que permita identificar las cuencas donde han ocurrido avenidas torrenciales, los tipos de flujos que se han generado, sus magnitudes, intensidades, áreas afectadas y condiciones meteorológicas preexistentes y detonantes. A partir de esa información se puede obtener intervalos de recurrencia promedio y, con la localización de las cuencas con antecedentes de torrencialidad, sus características morfométricas. Para ello se recomienda diligenciar el formato de inventario histórico de avenidas torrenciales presente en el anexo 1.

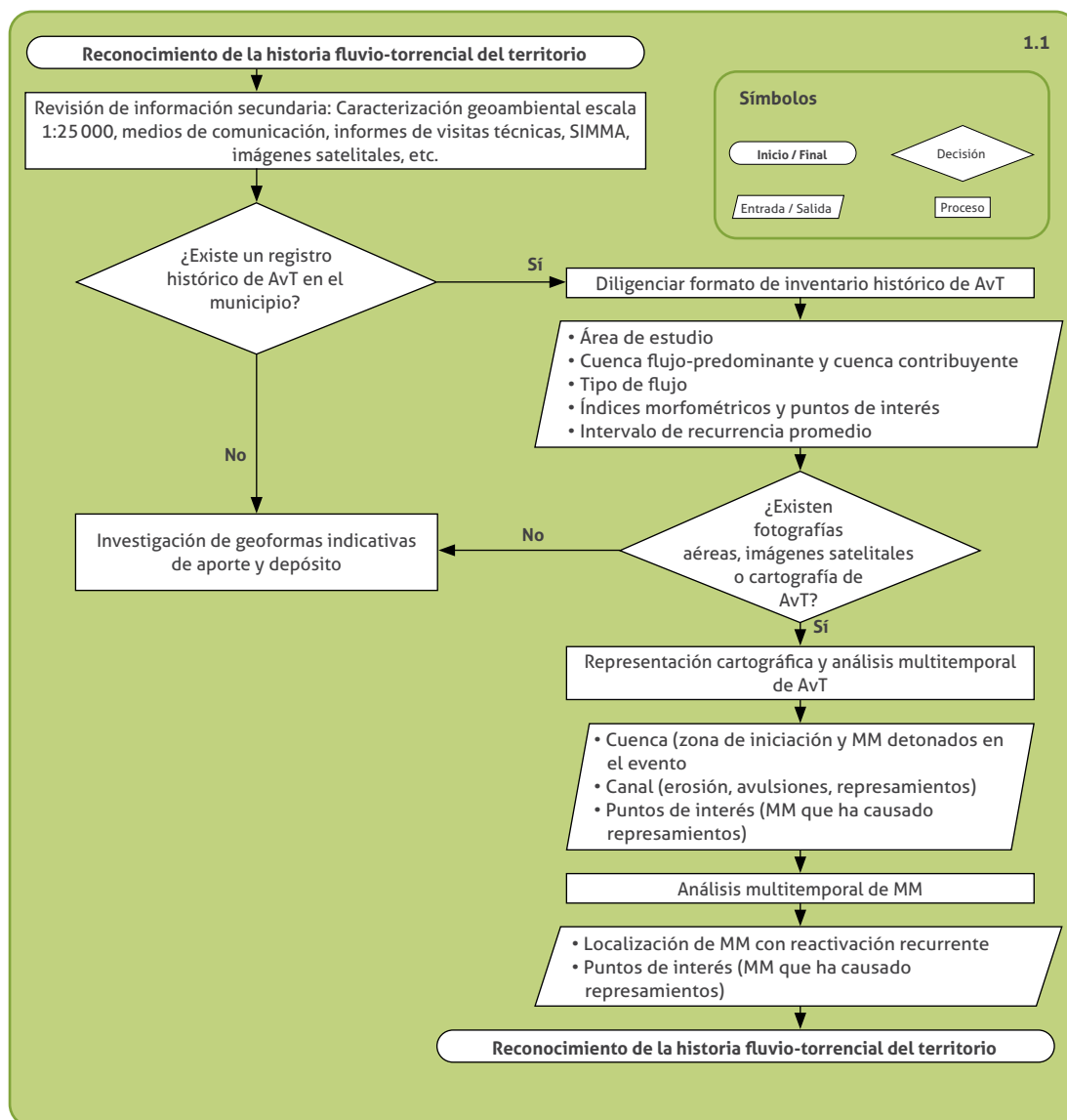
Si el municipio cuenta con imágenes satelitales y/o fotografías aéreas, se debe hacer la representación cartográfica de los eventos registrados en el inventario, como se muestra en el flujo de trabajo de la figura 10. Con la cartografía de los eventos se busca identificar las cuencas torrenciales, las posibles zonas de iniciación, y los movimientos en masa que aportaron sedimentos y que pudieron haber ocasionado represamientos. De igual manera, se deben representar todos los efectos causados por el flujo a lo largo de su tránsito,

como erosión lateral, avulsiones y la delimitación del depósito dejado por la avenida torrencial, que según la calidad de las imágenes se debe subdividir de acuerdo con la distribución de los sedimentos (sección 3.2.1.1.3.).

Por otra parte, el inventario de movimientos en masa y el análisis multitemporal realizado en el marco de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000 (Rodríguez *et al.*, 2017), deben ser retomados y complementa-

dos a la fecha de la ejecución de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales. Esto con el fin de identificar los movimientos en masa con mayor actividad a lo largo del tiempo, y por lo tanto su papel en la producción de sedimentos de la cuenca y en la generación de represamientos.

A continuación, se describe el procedimiento a seguir para obtener cada producto involucrado en el reconocimiento de la historia fluviotorrencial del territorio.



» **Figura 10.** Procedimiento para realizar el reconocimiento de la historia fluviotorrencial del territorio

3.2.1.1.1. Inventario histórico de avenidas torrenciales

La investigación histórica sobre eventos fluviotorrenciales permite encontrar información cuya evidencia en campo puede ser difícilmente rastreable (Schneuwly *et al.*, 2013), debido a su removilización por influencias antrópicas o meteorológicas con el paso del tiempo. Con el propósito de hacer ese registro histórico, se recomienda hacer un inventario de avenidas torrenciales, tomando como base el formato del anexo 1. Los campos a diligenciar están agrupados en las siguientes categorías: información general, localización, índices morfométricos de la cuenca, precipitación, unidades geológicas superficiales (UGS), subunidades geomorfológicas (SGMF), cobertura y uso del suelo, y depósito de la avenida torrencial.

3.2.1.1.2. Cálculo de índices morfométricos

El cálculo de índices morfométricos tiene como objetivo caracterizar morfométricamente la cuenca que ha presentado antecedentes de torrencialidad o evidencias geomorfológicas de ello. De esta manera se busca obtener un orden del grado de torrencialidad de la cuenca y los posibles tipos de flujos que pueda generar. Este cálculo también debe ser realizado en aquellas cuencas que a pesar de no tener registro histórico ni evidencias geomorfológicas de torrencialidad se consideran prioridad del municipio por contener centros poblados en su zona de tránsito o depósito o según el criterio experto (figura 10).

Hay varios índices morfométricos utilizados para determinar qué tipos de avenidas torrenciales pueden darse con mayor frecuencia en una cuenca, de los cuales son recomendados los siguientes: índice de Melton, longitud de la cuenca, relación del relieve, área de la cuenca, integral hipsométrica, tiempo de concentración, relación de bifurcación y coeficiente de torrencialidad.

Con base en un inventario de 204 eventos elaborado con el propósito de caracterizar morfométricamente las cuencas que han presentado avenidas torrenciales en Colombia, se proponen rangos de los índices recomendados para clasificar las cuencas según los tipos de flujos

que puedan desarrollar. En algunos casos, los rangos propuestos muestran solapamiento entre los tipos de flujos, lo que puede representar: (1) la ocurrencia de varios tipos de flujos en una misma cuenca (de Scally y Owens, 2004; Sohn *et al.*, 1999) controlados por las condiciones geológicas y meteorológicas de las regiones (Lavigne y Suwa, 2004); (2) los flujos de detritos y de lodos son iguales en términos de concentración volumétrica de sedimentos; (3) los flujos hiperconcentrados son la fase transicional entre una creciente de agua clara y un flujo de detritos o lodos (de Scally *et al.*, 2010; Khan *et al.*, 2013). En este sentido y como en cualquier evaluación de un proceso natural, se deben tener en cuenta todas las características que lo describen para entender su comportamiento. En el caso de las avenidas torrenciales los descriptores morfométricos de la cuenca no deben ser el único criterio para determinar qué tipo de flujos pueden ocurrir en ella, sino también su contexto geológico e hidroclimatológico, su historia fluviotorrencial, la cobertura y uso del suelo, entre otras características inherentes de cada zona de estudio.

A continuación, son descritos los índices morfométricos recomendados y los rangos que caracterizan las cuencas según los tipos de flujo evaluados e identificados en el territorio nacional.

» Índice de Melton

Se define como el relieve de la cuenca dividido por la raíz cuadrada de su área (ecuación 1) (Kain *et al.*, 2018; Welsh, 2007; Wilford *et al.*, 2004), y es considerado como uno de los mejores índices morfométricos para identificar los tipos de flujos que se puedan generar en una cuenca (Santangelo *et al.*, 2012; Welsh y Davies, 2011; Welsh, 2007; Wilford *et al.*, 2004). Al descubrir que los abanicos dominados por flujos de detritos están asociados con cuencas pequeñas y de relieve alto, Melton propuso un índice adimensional expresando la robustez de la cuenca, dirigido a clasificar abanicos según las características de la cuenca corriente arriba (Santangelo *et al.*, 2012). En términos generales, la discriminación propuesta por Wilford *et al.* (2004), donde las cuencas con predominancia de flujos de detritos presentan índices de Melton mayores a 0,6, de flujos hiperconcentrados entre 0,30 y

0,60, e inundaciones o flujos de corriente índices menores de 0,30, ha sido una de las más adoptadas por otros autores (Ouellet y Germain, 2014, 2010; Santangelo *et al.*, 2012; Welsh y Davies, 2011; Welsh, 2007; Zhou y Chang, 2016).

$$R = H_b / \sqrt{A_b} \quad (1)$$

En Colombia, el rango del índice de Melton se encuentra entre 0,15 y 0,91 para cuencas con ocurrencia de flujos de detritos y flujos de lodos, y de 0,06 a 0,50 para cuencas con desarrollo de flujos hiperconcentrados. En este sentido, las cuencas con predominancia de flujos hiperconcentrados presentan valores muy por debajo del rango propuesto por Wilford *et al.* (2004) (0,30-0,60) incluyendo también rangos de cuencas con desarrollo de inundaciones (<0,30). Por otra parte, las cuencas con predominancia de flujos de detritos en Colombia presentan un rango amplio del índice de Melton, incluyendo los valores propuestos por Wilford *et al.* (2004) para cuencas con flujos de detritos (>0,60), flujos hiperconcentrados y cuencas con predominancia de inundaciones. Las discrepancias entre los valores están relacionadas con las diferencias del contexto geológico e hidroclimatológico de cada región, el cual puede variar dentro de un mismo país. Sin embargo, son adoptados los rangos propuestos para Colombia con la recomendación de la verificación de los resultados mediante otras características de la cuenca, como su geología, antecedentes de torrencialidad y condiciones hidroclimatológicas.

» Longitud de la cuenca

Este índice es uno de las más implementados para conocer el tipo de flujo de mayor ocurrencia en una cuenca (p. ej., Camino *et al.*, 2018; Méndez y Marcucci, 2005), y está definido como la distancia planimétrica en línea recta entre el ápice del abanico (o zona de depósito) y el punto más lejano sobre el límite de la cuenca (Kain *et al.*, 2018; Santangelo *et al.*, 2012). Para Colombia los valores de este índice están entre 1 y 13 km en cuencas con predominancia de flujos de detritos (incluyendo flujos de lodos) y entre 1 y 21 km para cuencas con ocurrencia de flujos hiperconcentrados. Al comparar estos valores con los en-

contrados en otras latitudes se pueden identificar algunas diferencias, ya que las longitudes de cuencas donde se dan lugar flujos de detritos en países como Australia, Nueva Zelanda, Canadá, Pakistán e Italia presentan valores máximos entre 1,5 y 6,4 km (de Scally *et al.*, 2010; Khan *et al.*, 2013; Santangelo *et al.*, 2012; Welsh y Davies, 2011; Wilford *et al.*, 2004), y longitudes máximas entre 2,45 y 10,73 km en cuencas donde se desarrollan flujos hiperconcentrados (Kain *et al.*, 2018; Ouellet y Germain, 2010; Wilford *et al.*, 2004). En general, la longitud de las cuencas que presentan flujos de detritos son menores comparadas con aquellas donde predomina la ocurrencia de flujos hiperconcentrados. Sin embargo, el solapamiento de los valores puede ser explicado con la ocurrencia de más de un tipo de flujo en una misma cuenca y por el estado de transición que caracteriza a los flujos hiperconcentrados, como se hace referencia en la introducción de esta sección.

» Relación del relieve

Schumm (1956) propuso el análisis del relieve de una cuenca a través de la relación de relieve, el cual permite la comparación entre cuencas a pesar de las diferencias de escala topográfica; además, es un parámetro usado para describir la movilidad de material desde su punto de inicio hasta su frente de disposición (Chen y Yu, 2011). Este índice se define como la relación entre la diferencia de la cota máxima y mínima (relieve) [km] y la longitud de la cuenca [km] (Wilford *et al.*, 2004). En la revisión de literatura no se encontraron diferencias claras que permitieran asociar valores de este índice con los diferentes tipos de flujo. Sin embargo, se observó que los valores más altos reportados que reflejan mayor volumen deposicional en el abanico también disponen de menor volumen de material para entregar al canal principal. El rango de valores de la relación de relieve para cuencas que presentan flujos de detritos está entre 0,15 y 0,70 (Chen y Yu, 2011; de Scally *et al.*, 2010; Khan *et al.*, 2013), mientras que para flujos hiperconcentrados se encuentra entre 0,21 y 0,22 (Ouellet y Germain, 2014). Para Colombia se encontraron valores entre 0,08 y 0,43 para cuencas con desarrollo de flujos de detritos, entre 0,08 y 0,27 para cuencas

con flujos de lodos y entre 0,03 y 0,27 para cuencas con ocurrencia de flujos hiperconcentrados.

» Área de la cuenca

Corresponde al área plana en proyección horizontal de la cuenca y es ampliamente usado como índice morfométrico para identificar la torrencialidad. De Scally *et al.* (2010), Khan *et al.* (2013) y Santangelo *et al.* (2012) reportan áreas entre 0,10 km² y 9,66 km² donde predominan los flujos de detritos; mientras que Kain *et al.* (2018), y Ouellet y Germain (2014, 2010) presentan áreas entre 0,93 km² y 6,67 km² para cuencas con flujos hiperconcentrados. Para Colombia estos valores varían ampliamente, pero en general cuencas menores a 20 km² suelen presentar flujos de detritos con mayor probabilidad.

» Integral hipsométrica

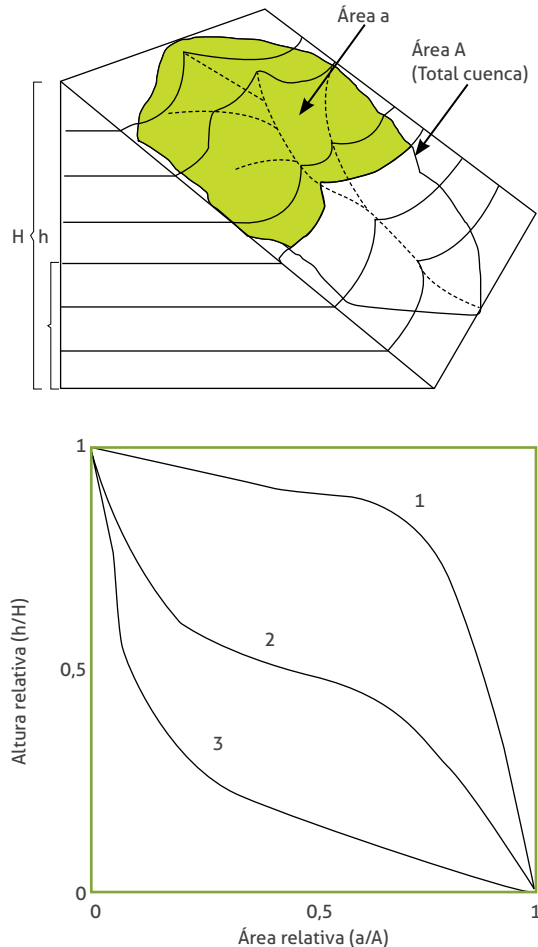
Este índice explica la distribución de elevaciones en un área dada del paisaje, particularmente una cuenca de drenaje (Wang *et al.*, 2016). La integral hipsométrica es ampliamente usada para la caracterización de la actividad tectónica reciente (expresada mediante valores altos, p. ej., $HI > 0,5$). Además, este índice es usado para evaluar de forma general la susceptibilidad por avenidas torrenciales, ya que permite determinar la interacción entre la erosión y la tectónica reciente (p. ej., Cheng *et al.*, 2016; García-Delgado, Villamizar-Escalante *et al.*, 2019; García-Delgado, Machuca *et al.*, 2019, 2020; Gómez, 2019; Meza *et al.*, 2014). Es definido como el área bajo la curva hipsométrica y se expresa como se ve en la ecuación (2) donde h_{max} es la elevación máxima en la cuenca de drenaje, h_{min} la elevación mínima y h_{mean} la elevación media de la cuenca:

$$HI = (h_{mean} - h_{min}) / (h_{max} - h_{min}) \quad (2)$$

Se realizó una recopilación detallada de la curva hipsométrica basada en los trabajos de (Hamdouni *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2010; Quezada y Jensen, 2010). La HI puede caracterizarse para tres rangos: $HI < 0,4$ representa un paisaje senil donde predominan los procesos de degradación; $0,4 < HI < 0,5$ se trata de un paisaje en equilibrio (p. ej., entre levantamiento tectónico

y erosión), y $HI > 0,5$ dan cuenta de un paisaje juvenil con actividad tectónica reciente. En Colombia las cuencas donde ocurren avenidas torrenciales se encuentran en el rango de los paisajes en equilibrio y los paisajes juveniles.

La integral hipsométrica también puede ser representada gráficamente mediante una curva, como se puede ver en la figura 11, donde h/H : proporción de la altura de la cuenca total; a/A : proporción del área total de la cuenca; (a) : fracción del área sobre una cota dada; (h) altura respecto al área total; (A) y (H) : altura de la cuenca. El área bajo la curva es la integral hipsométrica y su representación permite identificar dónde predomina la denudación y dónde el control tectónico dentro de la cuenca.



» **Figura 11.** Esquema ilustrativo de la definición de la curva hipsométrica

Fuente: Quezada y Jensen (2010).

Los paisajes en equilibrio (curva 2 en la figura 11) son aquellos donde la cuenca está experimentando una compensación de la actividad tectónica reciente mediante procesos de nudacionales. Los paisajes juveniles (curva 1 en la figura 11) son aquellos donde la cuenca está controlada en su totalidad por actividad tectónica reciente, lo cual se ve reflejado con valles cerrados en forma de V, incisados fuertemente por el drenaje dejando expuesto el lecho rocoso. Debido a la dinámica del paisaje se pueden dar estos dos estados evolutivos, que desarrollan condiciones morfológicas y sedimentológicas que favorecen la ocurrencia de avenidas torrenciales.

» Tiempo de concentración

Se entiende como el tiempo que demoran todos los puntos de una cuenca en aportar agua de escorrentía, de forma simultánea, al punto de salida de la cuenca (Meza *et al.*, 2014). Para el cálculo del tiempo de concentración se tienen varias ecuaciones y definiciones complementarias, como se muestra en Fuentes (2004), donde se define como “el tiempo transcurrido entre el final del hietograma de excesos y el final del escurrimiento directo”, o “el lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial”. Algunas de las expresiones matemáticas que se pueden usar se presentan en las ecuaciones (3), (4) y (5). En este trabajo se recomienda que para el cálculo del tiempo de concentración se realice un promedio de las aproximaciones empíricas que se puedan implementar.

$$Tc[min] = (4A^{0.5} + 1.5L)/(0.8(H_m - H_0)^{0.5}) \quad (3)$$

$$Tc[min] = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.38577} \quad (4)$$

$$Tc[min] = \frac{0.396L}{i^{0.5}} \left(\frac{A}{L^2} \left(\frac{i}{i_v} \right)^{0.5} \right)^{0.72} \quad (5)$$

En la literatura se presentan resultados de investigaciones con el uso de ecuaciones empíricas aplicadas en cuencas con flujos torrenciales; los tiempos de concentración varían entre 7,40 y 35,40 minutos (Berti *et al.*, 1999; Meza Aliaga *et al.*, 2014). Al comparar los resultados del inven-

tario nacional con lo reportado en la literatura, se encontró que entre el 40% y el 50% de los eventos están dentro del rango de la literatura; sin embargo, también se observa que hay eventos en cuencas con tiempos de concentración hasta de 150 min. Dado lo anterior, se proponen los siguientes rangos de acuerdo con el tipo de flujo: flujo de detritos: 4-51 min; flujo de lodos: 2-38 min; flujos hiperconcentrados: 11-90 min.

» Relación de bifurcación

Horton (1945) introdujo este concepto para definir el coeficiente entre el número de cauces de cualquier orden (Nr_n) y el número de corrientes del siguiente orden superior (Nr_{n+1}), ecuación (6).

$$Rb = Nr_n / Nr_{(n+1)} \quad (6)$$

De acuerdo con Summerfiel (1993), cuencas con litología homogénea normalmente presentan relaciones de bifurcación entre 3 y 5, altos valores de esta relación indican que la cuenca es muy elongada con alternancia de afloramientos contrastantes en sus características litológicas. Por otro lado, los valores bajos se asocian con cuencas bien drenadas susceptibles a crecidas más violentas que aquellas que poseen un coeficiente de bifurcación alto. Con relación a las cuencas evaluadas en el inventario nacional, se observa que cerca del total de los flujos e inundaciones de lodos respetan el umbral de la relación de bifurcación reportada. Los rangos para el coeficiente de bifurcación propuestos para las cuencas del inventario nacional se presentan según el tipo de flujo: flujo de detritos 2,45-5,20, flujo de lodos 2,83-5,24 y flujos hiperconcentrados 3,00-5,25.

» Coeficiente de torrencialidad

Este índice es un indicador de la erodabilidad lineal y la capacidad de descarga de una cuenca. Se determina a partir de la relación entre el número total de cursos de primer orden (Nc_1) y el área total de la cuenca (A), ecuación (7) (Camino *et al.*, 2018). A mayor número de cursos de primer orden y menor superficie, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Camino *et al.*, 2018; López y Romero, 1987). Debido a

que los cursos de primer orden son de génesis erosiva, altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menores tiempo de llegada al pico y alta torrencialidad; en otras palabras, los cursos de orden 1 son los de mayor importancia en la generación de flujos torrenciales y de inundaciones aluvionales veloces (Busnelli y Horta, 2014). El coeficiente de torrencialidad es calculado de manera general para cuencas con avenidas torrenciales, pero sin hacer distinción entre ellos con valores muy amplios entre 0,76 y 3,85 en cuencas de Venezuela y Argentina (Camino *et al.*, 2018; Méndez *et al.*, 2016; Méndez y Marcucci, 2005). En este rango solo se traslapa el 30 % de las cuencas del inventario nacional. Los rangos propios para las cuencas colombianas se presentan de acuerdo con el tipo de flujo: flujo de detritos 0,38-26,90, flujo de lodos: 1,01-21,51 y flujos hiperconcentrados: 0,37-18,01.

$$Ct = Nc1/A \quad (7)$$

» Gradiente-longitud del canal (SL)

Se define como el producto de la pendiente del canal en un punto y la longitud del canal medido a lo largo de la corriente más larga sobre el punto dado (Hack, 1973). El índice de gradiente-longitud de la corriente (SL, por su sigla en inglés) permite identificar desviaciones a partir de perfiles longitudinales y señala *knickpoints/knickzones* donde el gradiente de la corriente muestra valores anómalos (Piacentini *et al.*, 2020). El índice SL es sensible a los cambios de pendiente, por tanto, permite la evaluación de las relaciones entre: actividad tectónica, resistencia de la roca y la topografía. Las anomalías señaladas por este índice pueden interpretarse en términos del contraste de la resistencia de los materiales (Keller y Pinter, 2002; Piacentini *et al.*, 2020):

- Valores altos: rocas más duras.
- Valores bajos: rocas más blandas.
- Valores anómalos altos de SL en rocas blandas como *shale*: actividad tectónica reciente.
- Valores anómalos bajos de SL en rocas duras (p. ej., cuarcita o caliza): fallas rumbo-deslizantes paralelas a los valles.

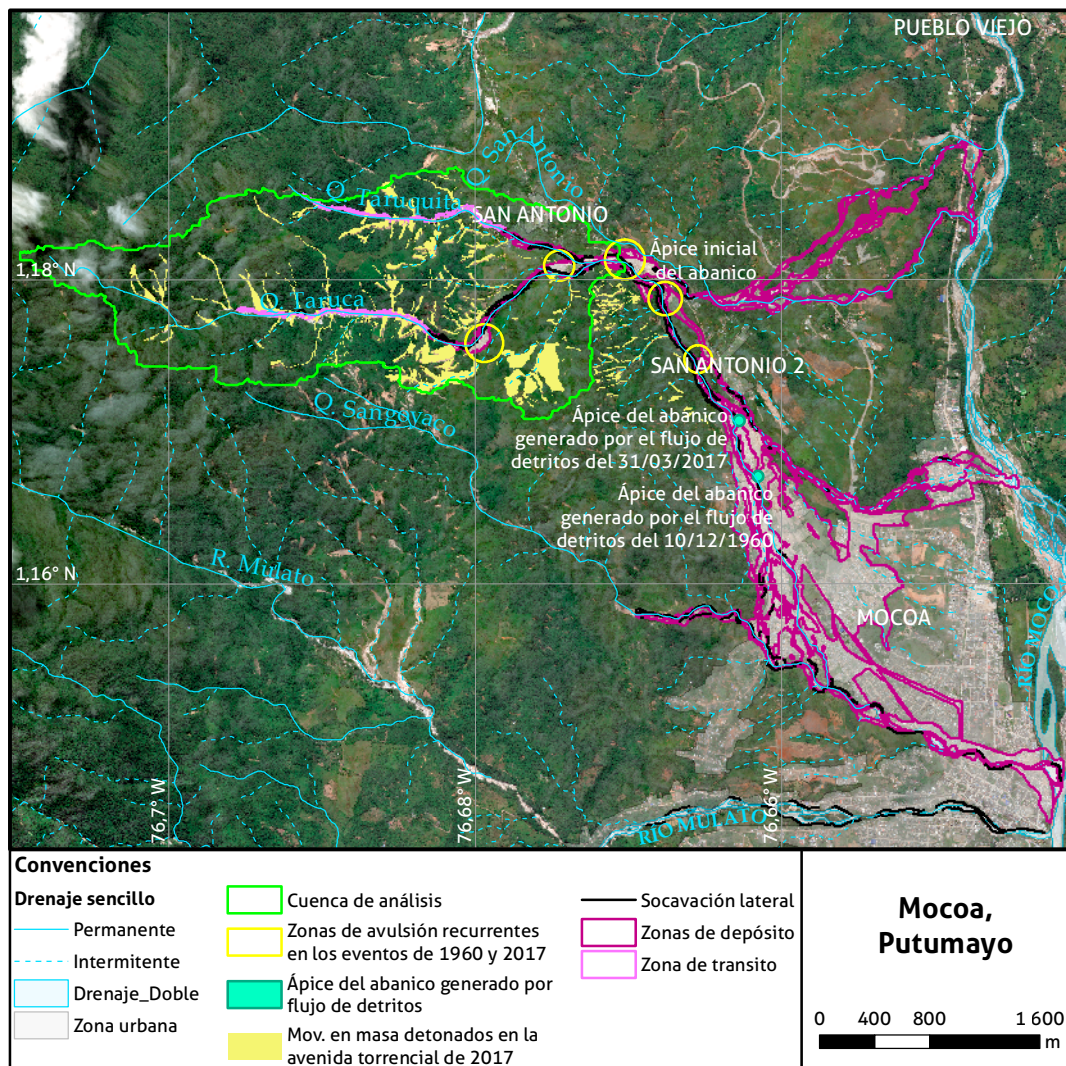
De igual manera, el índice gradiente-longitud de la corriente (SL) o índice de Hack permite identificar otras perturbaciones dentro del canal como las masas desplazadas de movimientos en masa, las cuales se convierten en un elemento clave para la formación de represamientos y fuente directa de sedimentos. Trabajos como el de Troiani *et al.* (2014) hacen referencia a la utilidad de este índice en la detección de acumulación de sedimentos en el cauce mediante valores anómalos altos del SL.

Como se puede observar, este índice expresa la interacción entre los factores geológicos de una cuenca y los procesos morfodinámicos evidentes a lo largo del canal. Su amplia implementación en investigaciones geológicas y asociadas con amenazas geológicas, especialmente en movimientos en masa (Hamdouni *et al.*, 2010; Kothyari y Luirei, 2016; Koukouvelas *et al.*, 2018; Troiani *et al.*, 2014) permiten tomar el índice SL como uno de los criterios en la identificación de los puntos de interés a lo largo de la zona de tránsito como se verá en la sección 3.2.2.4. Para el cálculo de este índice se recomienda el uso del *toolbox* creado por Piacentini *et al.* (2020) donde el único insumo necesario es el MDT del área de estudio.

3.2.1.1.3. Representación cartográfica del inventario de avenidas torrenciales históricas y análisis multitemporal

Según la disponibilidad de fotografías aéreas e imágenes satelitales, la espacialización de las avenidas torrenciales diligenciadas en el formato de inventario debe incluir la cuenca de análisis, las cuencas o zonas contribuyentes, la zona de depósito y la distribución de los sedimentos, la zona de tránsito, los procesos de avulsión y erosión detonados por el paso del flujo, y los movimientos en masa detonados o reactivados por el mismo evento hidroclimatológico. En algunos casos, como en el ejemplo mostrado en la figura 12, la cuenca o zona contribuyente corresponde a toda la cuenca de análisis.

Para la representación cartográfica de avenidas torrenciales se proponen los atributos enlistados en la tabla 5 teniendo en cuenta los acrónimos propuestos en la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en*



» **Figura 12.** Esquema ilustrativo sobre los elementos a identificar en la representación cartográfica de una avenida torrencial, municipio de Mocoa, Putumayo

Fuente: elaboración propia a partir de Rodríguez *et al.* (2017): cartografía del evento y ortofotomosaico.

masa, escala 1:25 000 (Rodríguez *et al.*, 2017). Es bien sabido que llevar a cabo la espacialización de los eventos históricos es una actividad que está limitada por la disponibilidad de imágenes que tenga el municipio (sección 3.1.2.). Por este motivo se debe recurrir a fotos, mapas y descripción del evento encontrados en informes técnicos y demás información secundaria que permita acercarse a la espacialización del flujo y la correcta localización de la cuenca de análisis. También es posible que exista el caso contrario, donde hay disponibilidad de imágenes satelitales

o fotografías aéreas, pero no hay documentación respecto al evento; en este caso se debe hacer la respectiva cartografía y el diligenciamiento de los campos del formato que sean posibles, según lo permita la resolución o escala de la imagen.

La representación cartográfica al igual que el inventario de avenidas torrenciales permite definir intervalos de recurrencia promedio, si se tiene como mínimo dos eventos de magnitudes similares. El intervalo de recurrencia promedio se define como el cociente entre el periodo de recurrencia (periodo de tiempo en el que se

tienen registros de flujos) y el número de flujos registrados en ese periodo de tiempo (Coe *et al.*, 2000, 2019; Crovelli, 2000).

» Criterios para la cartografía de avenidas torrenciales

La identificación y cartografía de avenidas torrenciales mediante la interpretación de imágenes digitales o análogas depende de su resolución, escala o tipo de sensor con que se obtuvieron; sin embargo, hay características que son comunes independientemente del insumo implementado (Elkadiri *et al.*, 2014), algunas de ellas son descritas en la tabla 6.

3.2.1.1.4. Análisis multitemporal de movimientos en masa

Un análisis multitemporal enfocado a movimientos en masa se basa en la identificación de cambios en la morfodinámica de una región durante un rango de tiempo a partir de imágenes de sensores remotos o fotografías aéreas (p. ej., Del Ventisette *et al.*, 2014; Portilla, 2014; Tsai *et*

al., 2010). Sin embargo, el análisis multitemporal de movimientos en masa aplicado al reconocimiento de la historia fluviotorrencial del territorio debe ser complementado con la identificación de las cuencas o zonas contribuyentes o de iniciación, así como de los movimientos que por su frecuente reactivación y volumen generado pueden conducir a represamientos (p. ej., Blahut *et al.*, 2010; Staley *et al.*, 2014).

3.2.1.2. Identificación de la geomorfología indicativa y temporalidad relativa

La identificación de la geomorfología indicativa corresponde a la segunda subetapa dentro de la recopilación y análisis de información secundaria. Entre los objetivos de esta subetapa se encuentra la identificación de las áreas de estudio a partir de la geomorfología indicativa y la localización de centros poblados, esto en caso de que no se encuentre registro histórico de avenidas torrenciales y como parte del reconocimiento de la historia fluviotorrencial del territorio. Otro

» **Tabla 5.** Atributos de la capa del inventario de avenidas torrenciales

ID	Identificador del formato de inventario
Tipo de flujo	Flujo de detritos o flujo hiperconcentrado.
Subtipo	Flujo de detritos, flujo de lodos, inundación de lodos o inundación de detritos.
Cuenca	Nombre del cauce donde ocurrió la avenida torrencial.
Zona	av-t: zona de tránsito, av-d: zona de depósito, av-da: zona de avulsión, av-c: cauce. Si se puede separar el depósito según la distribución de los sedimentos, se debe hacer identificándolos con un número consecutivo después del acrónimo av-d. Ejemplo: av-d1, av-d2.
Fecha de ocurrencia	Fecha en la que ocurrió la avenida torrencial.
Sedimentos depositados	Descripción de los tamaños de sedimentos depositados: lodo, cantos, bloques, troncos de árboles etc. Si la zona de depósito se puede separar según la distribución de los sedimentos, se debe hacer una descripción de estos por cada polígono.
Espesor del depósito (m)	Espesor de los sedimentos depositados. Si la zona de depósito se puede separar según la distribución de los sedimentos, se debe señalar el espesor de estos por cada polígono.
Altura de lámina de agua (m)	Altura que haya alcanzado el flujo en ese polígono. Si la zona de depósito se puede separar según la distribución de los sedimentos, se debe señalar la altura de la lámina de agua por cada polígono.
Fuente de la información	Fuentes de información secundaria a partir de las cuales se hizo la cartografía.
Área (m ²)	Área de los polígonos digitalizados.
Índice de Melton	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Longitud axial de la cuenca	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Relación del relieve	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Área de la cuenca	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Integral hipsométrica	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Tiempo de concentración	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Coefficiente de bifurcación	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Coefficiente de torrencialidad	Resultado del cálculo del índice morfométrico.
Observaciones	Información adicional que se considere necesaria.

» **Tabla 6.** Criterios para la cartografía de avenidas torrenciales mediante fotointerpretación

Morfología	<ul style="list-style-type: none"> • Tramos denudados lineares que siguen las quebradas o corrientes; evidencia de fuerte erosión y vegetación removida; algunas veces marcadas por diques de sedimentos. • La quebrada, torrente o corriente donde se dio lugar el flujo muestra una rugosidad superficial más alta que en las áreas circundantes. • Presencia de geoformas indicativas de depósito como abanicos, fases canalizadas dentro de la cuenca con depósitos de detritos relictos y cicatrices. • Microrrelieves paralelos, adyacentes o sobre las corrientes, asociados a la acumulación de sedimentos.
Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos recientes muestran ausencia completa de vegetación; flujos más antiguos son cubiertos por vegetación secundaria o de transición baja. • Los flujos de detritos suelen dejar una gran área de suelos o roca desnudos que parecen brillar en la región de la longitud de onda visible comparado con las áreas vegetadas circundantes, las cuales son oscuras (esto aplica para imágenes pancromáticas, en el caso de imágenes sentinel la vegetación presenta tonalidades rojizas). • Áreas elongadas de tonalidad clara en la cabecera de las quebradas o solo debajo de los quiebres de la pendiente.
Drenaje	<ul style="list-style-type: none"> • Senda de detritos a lo largo del paso del flujo; evidencia de bifurcación sobre el abanico de detritos; evidencia de bloqueo temporal de la corriente por depósitos en la unión con canales tributarios. • El modelo del drenaje presenta anomalías con cauces rodeando lóbulos de depósitos. • Alteración un cauce por el depósito de un abanico.

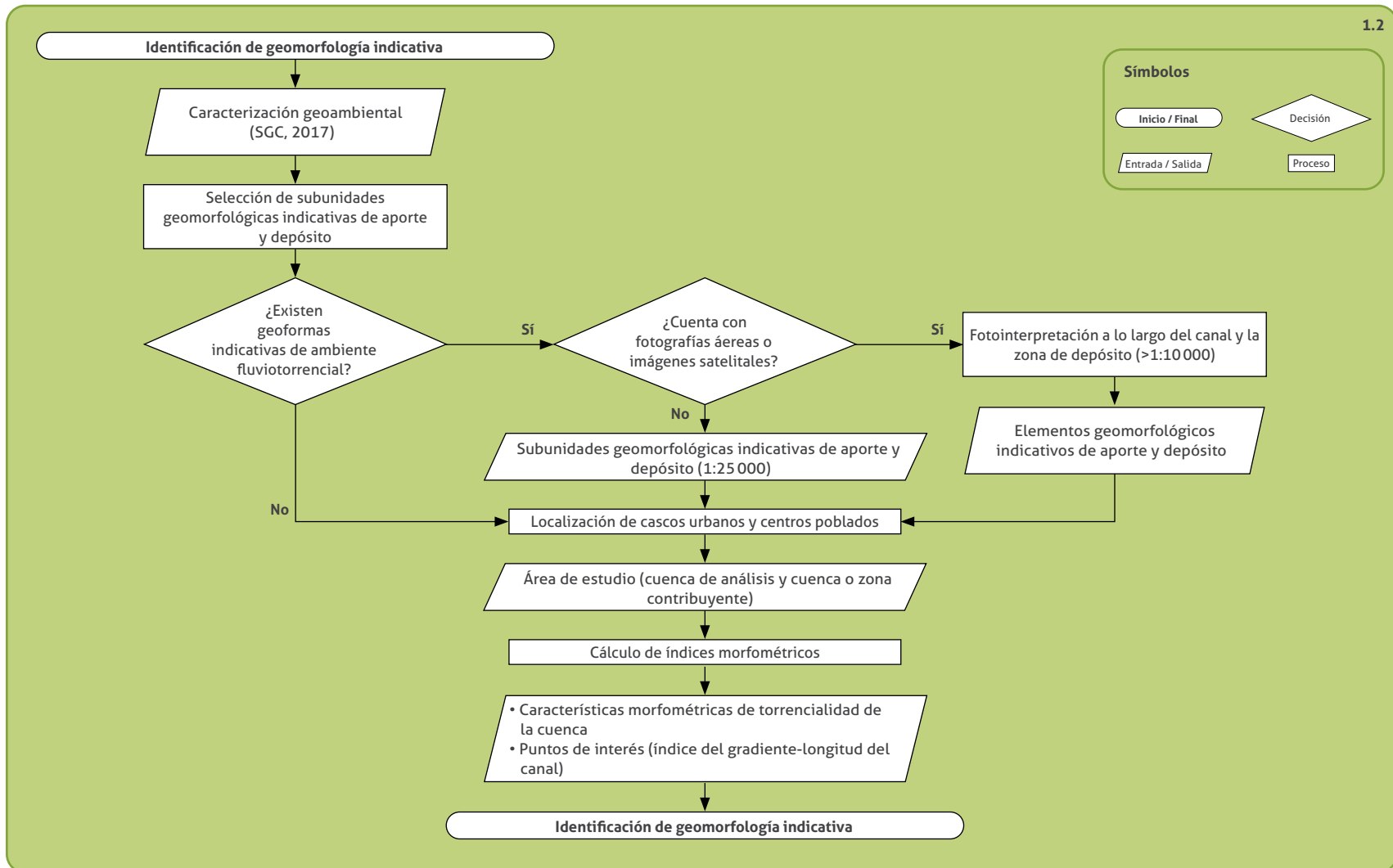
Fuente: recopilado de Elkadiri *et al.* (2014); Jakob y Hungr (2005).

objetivo de esta subfase es identificar las geoformas indicativas de depósito que pueden ser de origen fluviotorrenciales, o fluvial principalmente, o de otro origen si es necesario y están dentro de la zona de influencia del depósito de una avenida torrencial, que después de su corroboración en campo definirán la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales.

Las geoformas indicativas de aporte son aquellas que se caracterizan por estar en inmediaciones del canal o la zona de tránsito, y por tanto se consideran una fuente directa de sedimentos en una avenida torrencial.

Las geoformas indicativas de zonas de depósito pueden ser fluviales, fluviotorrenciales o de otro origen, si es el caso, y están asociados al área de influencia del depósito de una avenida torrencial. Como se puede ver en el anexo 3, algunas geoformas pueden ser indicativas tanto de zonas de aporte como de zonas depósito, la definición del aporte depende del criterio del profesional y de la localización de la geoforma dentro del área de estudio y su interacción con la dinámica fluviotorrencial. Por ejemplo, un cono de flujo de detritos (Dfd) es una geoforma que da cuenta de ocurrencia de avenidas torrenciales, en este sentido se considera una geoforma indicativa de depósito; sin embargo, también puede ser una geoforma indicativa de aporte si el drenaje que le dio origen confluye en uno de mayor orden que también presenta evidencias de torrencialidad.

En la figura 13 se presenta el flujo de trabajo que se desarrolla en esta subetapa, el cual comienza con la identificación de geoformas indicativas a partir de las subunidades geomorfológicas generadas en el marco de la evaluación de amenaza por movimientos en masa 1:25 000 (sección 3.1.3.). Si existe la suficiente información secundaria para detallar la geomorfología se debe realizar la fotointerpretación correspondiente a subunidad o incluso llegar al nivel de elemento geomorfológico, con el fin de identificar geoformas indicativas de aporte de sedimentos en la zona de tránsito y mejorar las asociadas a zonas de depósito. En caso de que no exista la información necesaria para aumentar la escala de la cartografía geomorfológica, las subunidades geomorfológicas y la localización de los centros poblados y urbanos, además de las prioridades de los municipios, definirán las áreas de estudio. Sin embargo, el detalle cartográfico deberá ser realizado en la fase de trabajo de campo. Esas áreas de estudio, que complementan las ya definidas con el inventario histórico de avenidas torrenciales, también deberán estar conformadas por una o varias cuencas de análisis y zonas de depósito según sea el caso. Al igual que a las áreas de estudio definidas a partir del inventario histórico de avenidas torrenciales, deben ser caracterizadas morfométricamente y se les debe definir las cuencas o zonas contribuyentes.



» Figura 13. Procedimiento para la identificación de la geomorfología indicativa



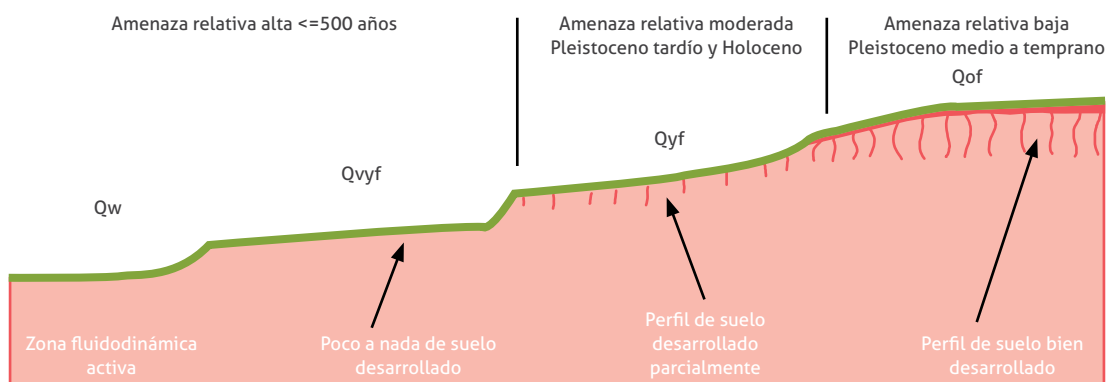
3.2.1.2.1. Zonificación preliminar de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales a partir de las geoformas indicativas de depósito fluviotorrencial

Las geoformas indicativas de depósito son el criterio para realizar la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales. Este método geomorfológico es comúnmente implementado para evaluar de forma relativa la susceptibilidad por avenidas torrenciales e inundaciones (Lancaster *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2017; Youberg *et al.*, 2008). Las geoformas indicativas de depósito fluviotorrencial corresponden a las identificadas por el Servicio Geológico Colombiano, de ser necesario y de acuerdo con las características específicas del proyecto, pueden complementarse con otras según el ambiente geológico y geomorfológico. De esta manera, se propone la clasificación según su edad relativa en categorías de susceptibilidad geomorfológica reciente/alta, subreciente/media y antigua/baja como se puede ver en la tabla 7. El criterio de esa

clasificación está basado en el concepto de temporalidad o edad relativa. Es decir, las geoformas que se encuentran más cerca al cauce actual en términos de distancia transversal y altura se consideran más recientes, y por tanto con mayor potencial a ser nuevamente ocupadas por avenidas torrenciales, contrario a aquellas que se encuentran más distales y/o más elevadas (figura 14) (Bowman, 2019; Lancaster *et al.*, 2012; Robbins *et al.*, 2008; Youberg *et al.*, 2008). La cartografía de las geoformas debe tener en cuenta la representación cartográfica de los eventos registrados en el inventario, cuyas zonas de depósitos deben estar contenidas en las geoformas indicativas de depósito más recientes. La cartografía de las geoformas indicativas y la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales preliminar, llevada a cabo en esta subetapa, deben ser corroboradas y detalladas durante el trabajo de campo; es importante resaltar que según el conocimiento del territorio y del experto se pueden calificar geoformas de otro origen si es necesario y están dentro de la zona de influencia de una avenida torrencial.

» **Tabla 7.** Temporalidad relativa de las geofomas indicativas de zonas de depósito

Temporalidad relativa/Susceptibilidad geomorfológica	Subunidades geomorfológicas indicativas de zonas de depósito	Acronimo
Reciente/alta	Cono flujos de detritos	Dfd
	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	Dft
	Flujo de detritos canalizados-Cono o lóbulo de flujo de detritos	Dlfd
	Cono o lóbulo de flujo de lodo	Dlfl
	Abanico aluvial	Faa
	Abanico aluvial actual	Faaac
	Abanico fluviotorrencial	Faft
	Abanico fluviotorrencial actual	Fafta
	Abanico fluviotorrencial coalescente	Faftc
	Cono de deyección	Fcdy
	Depósitos aluviales recientes	Fdar
	Plano o llanura de inundación	Fpi
	Terraza aluvial	Ft
	Terraza de acumulación	Fta
	Terraza de acumulación baja-Nivel de terraza bajo	Ftab-Ftb
	Flujo fluviotorrencial actual	Ftac
	Terraza fluviotorrencial	Ftft
	Valle fluviotorrencial	Fvft
Subreciente/media	Abanico aluvial subreciente	Faas
	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (bajadas)	Fac
	Terraza de acumulación media-Nivel de terraza medio	Ftam-Ftm
	Terraza de acumulación subreciente	Ftas
	Flujo fluviotorrencial subactual	Ftsa
	Abanico fluviotorrencial subreciente	Fafts
Antigua y muy antigua/baja	Abanico aluvial antiguo	Faaa
	Abanico aluvial incidido	Faai
	Abanico fluviotorrencial antiguo	Faan
	Abanico fluviotorrencial coalescente antiguo	Faftca
	Abanico fluviotorrencial muy antiguo	Faman
	Depósitos aluviales antiguos	Fdaa
	Terraza de acumulación antigua	Ftan
	Plano o llanura de inundación alta	Fpia
	Terraza de acumulación alta-Nivel de terraza alto	Ftaa-Fta
Abanico aluvial muy antiguo	Faaman	

» **Figura 14.** Perfil geomorfológico ilustrativo de la amenaza relativa por avenidas torrenciales citada en Lancaster *et al.* (2012), cuyos criterios son adoptados para la definición de la susceptibilidad geomorfológica propuesta en esta guíaFuente: traducido de Lancaster *et al.* (2012).

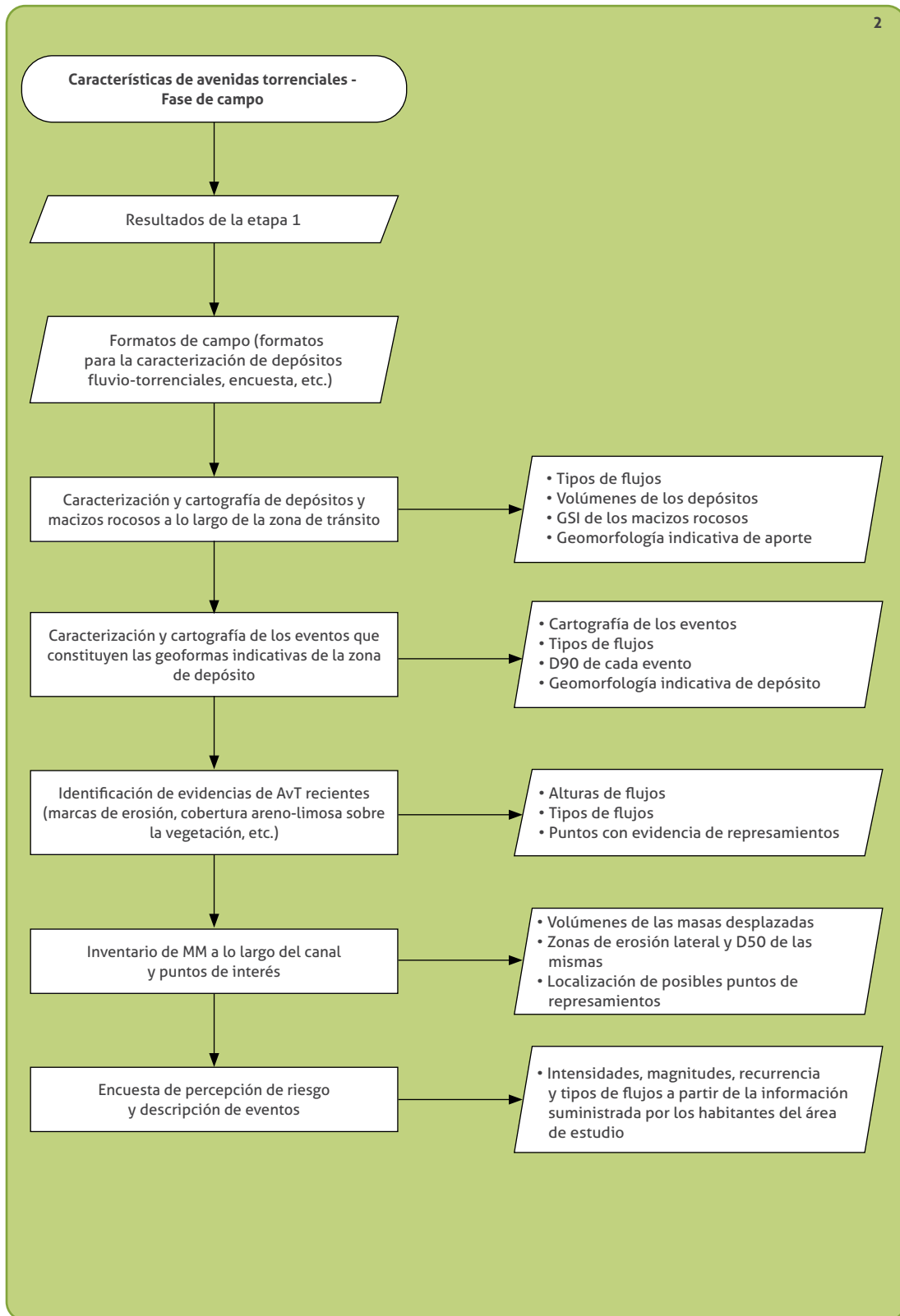
3.2.1.3. Identificación de materiales y depósitos a lo largo de la zona de tránsito y zona de depósito fluviotorrencial

La última subetapa dentro de la recopilación y análisis de la información secundaria corresponde a la identificación de los depósitos presentes en el área de estudio. Con base en el mapa de unidades geológicas superficiales (sección 3.1.3.) y las geoformas indicativas de aporte y depósito previamente identificadas y detalladas, se deben identificar todos los depósitos (coluviales, fluviotorrenciales, aluviales, volcánicos) a lo largo de la zona de tránsito y la zona de depósito. Se hace énfasis en los depósitos encontrados a lo largo de la zona de tránsito ya que estos son considerados fuente directa de sedimentos en una avenida torrencial. Sin embargo, durante el trabajo de campo se debe hacer la cartografía no solo de todos los depósitos de la zona de tránsito, sino también de todos los macizos rocosos, o suelos residuales que por motivos de escala en las unidades geológicas superficiales definidas durante la evaluación de amenaza por movimientos en masa 1:25 000 (sección 3.1.3.) no fueron caracterizados.

3.2.2. Caracterización de avenidas torrenciales en campo

La segunda etapa dentro de la caracterización de avenidas torrenciales corresponde al trabajo realizado en campo, cuyos procesos y productos resultantes se ilustran en la figura 15. Esta etapa no solo está enfocada en la caracterización de los depósitos de origen fluviotorrencial, sino de todos los elementos geomorfológicos, geológicos y morfodinámicos contribuyentes y resultantes de una avenida torrencial. Los insumos necesarios para llevar a cabo el trabajo de campo son los productos de la etapa de recopilación y análisis de la información secundaria (sección 3.2.1.), es decir, las geoformas indicativas de depósito y aporte, las UGS equivalentes a esas geoformas, la cartografía de los eventos del inventario de avenidas torrenciales, las anomalías del índice de gradiente-longitud del canal, los puntos considerados de interés por ser posibles zonas de represamiento o donde los movimientos en masa mostraron reactivación recurrente en el análisis multitemporal, además de los formatos y demás insumos considerados necesarios por el profesional. A continuación, se describen los procesos citados en la figura 15.





» **Figura 15.** Esquema de las entradas, procesos y productos involucrados en la caracterización de avenidas torrenciales en campo

3.2.2.1. Caracterización y cartografía de depósitos y macizos rocosos a lo largo de la zona de tránsito

Este proceso consiste en caracterizar todos los depósitos encontrados a lo largo de la zona de tránsito, para aquellos que son de origen fluviotorrencial, fluvial o aluvial se recomienda el formato expuesto en el anexo 2. Mediante la descripción de los depósitos de origen fluviotorrencial se busca identificar si existen variaciones de concentración de sedimentos en los flujos que se dan lugar a lo largo de la zona de tránsito, e identificar qué tipos de flujos llegan finalmente hasta la zona de depósito. De igual manera en la zona de tránsito se debe verificar, identificar y detallar las geoformas indicativas de aporte definidas inicialmente mediante fotointerpretación.

Por otra parte, los macizos rocosos presentes a lo largo de la zona de tránsito también deben ser caracterizados desde el punto de vista de su calidad y de su calificación del GSI; deben ser determinados con base en los lineamientos definidos en la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017). Esta información debe identificarse dentro de la cartografía de UGS diligenciando el valor de GSI para unidades de roca y el espesor (m) para el caso de suelos residuales o depósitos.

Otro de los objetivos de esta actividad en campo es determinar el volumen disponible de sedimentos a lo largo de la zona de tránsito o canal principal de la cuenca, lo cual incluye el volumen de los depósitos coluviales, fluviotorrenciales, aluviales, volcániclasticos y, en general, depósitos de cualquier origen que puedan ser fuente directa de sólidos. Después de la fase de campo, ese volumen total disponible debe ser subdividido según las unidades de modelación definidas en la etapa de detonantes (capítulo 4), cuyos valores resultantes serán posteriormente usados en la fase de estimación de volúmenes de sólidos (sección 5.1.).

3.2.2.2. Caracterización y cartografía de los eventos que constituyen las geoformas indicativas en la zona de depósito

Esta actividad de campo se desarrolla en la zona de depósito y tiene como objetivo describir y

hacer la cartografía de los eventos que constituyen las geoformas indicativas de depósito, para lo cual se recomienda el formato de caracterización de avenidas torrenciales expuesto en el anexo 2. Esa descripción debe incluir el D_{90} o el D_{max} de los eventos encontrados en la zona de depósito; se recomienda determinar el D_{90} si los depósitos presentan selección muy mala, y el D_{max} , si la selección se encuentra entre muy buena a mala. Para el desarrollo de esta actividad se recomienda la ejecución de trincheras o apiques.

En campo se debe corroborar que efectivamente las temporalidades relativas asignadas a las geoformas mediante la fotointerpretación también son expresadas con las propiedades físicas de sus depósitos. Sin embargo, es importante dejar claro que ningún método relativo reemplaza la exactitud que da la datación de los materiales mediante metodologías como radiocarbono, dendrogeomorfología, etc., para la asignación de edades de los eventos más jóvenes. Entre las características más comunes para saber si un depósito es más antiguo respecto a otro se encuentra el desarrollo de suelo y el estado de meteorización de los clastos como se explica a continuación:

» Desarrollo de suelo

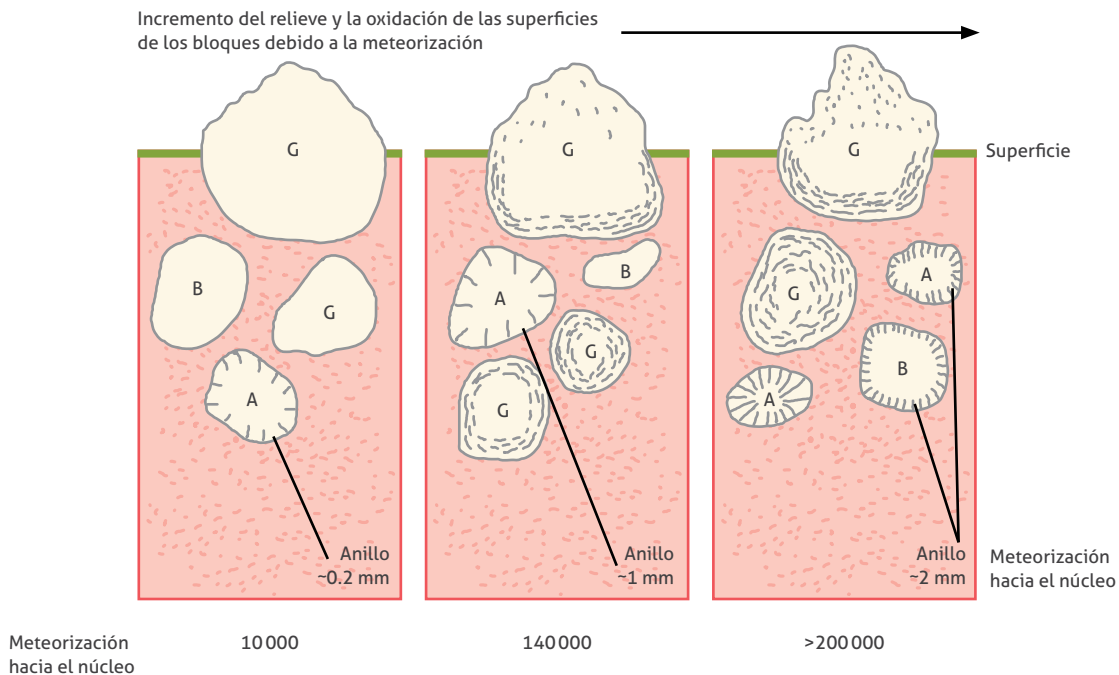
Es de esperar que el desarrollo de suelo en un depósito sea proporcional a su edad (Kochel, 1987; Lancaster *et al.*, 2012). Por lo cual aquellos depósitos con presencia casi nula de suelo son los más jóvenes (<500 años) y aquellos con un perfil de suelo bien desarrollado son característicos de los depósitos más antiguos (Pleistoceno medio a temprano, 781 000 años-2,58 Ma aprox.) (Lancaster *et al.*, 2012) (figura 14). En el anexo 2 se presenta el formato para el levantamiento de esta información y se explica la forma de diligenciar.

» Estado de meteorización de la fracción gruesa

El estado de meteorización en el que se encuentren los cantos y bloques de un depósito es uno de los indicadores sobre su edad relativa respecto a otros depósitos (p. ej., Birkeland, 1984; Knott y Sarna-Wojcicki, 2001; Kochel, 1987; Oguchi, 2013; Youberg *et al.*, 2008). En depósitos recientes todos o la mayoría de los clastos no presentan meteoriza-

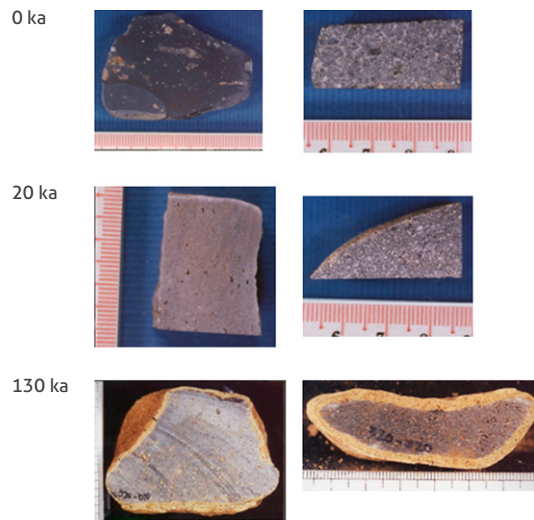
ción y tienen apariencia fresca, los clastos de los depósitos subrecientes están levemente meteorizados con superficies de oxidación de tonalidad clara y tal vez levemente fracturados (p. ej., Youberg *et al.*, 2008). Por su parte, los depósitos antiguos y muy antiguos tienen clastos moderadamente a fuertemente meteorizados, con desarrollo de anillos de meteorización profundos, con manchas o superficies de oxidación oscuras, exhibiendo comúnmente fracturamiento y descamación (p. ej., Youberg *et al.*, 2008). La tonalidad de las superficies de oxidación depende del grado de meteorización química que están sufriendo minerales como piroxenos, anfíboles y micas; cuando su meteorización pasa a un estado más desarrollado, es común que estos minerales se conviertan a arcillas, lo cual está relacionado con la edad relativa del depósito que para el último caso sería muy antiguo.

Otras características que permiten diferenciar la temporalidad relativa de los depósitos son descritas por autores como Birkeland (1984), quien hace referencia al desarrollo de irregularidades en la superficie de los cantos o bloques, y la formación de anillos de meteorización cada vez más profundos con el paso del tiempo. En la figura 16, Birkeland (1984) muestra los estados de meteorización que pueden desarrollar los clastos dependiendo de su grado de enterramiento y composición litológica. Como se puede ver, con el paso del tiempo el relieve o irregularidad de la superficie de los clastos que se encuentran más cerca de la superficie aumenta. De igual manera, las rocas andesíticas desarrollan un anillo de meteorización que va aumentando su espesor con el paso del tiempo (p.ej., Oguchi, 2013) (figura 17).



» **Figura 16.** Variación en la meteorización subaérea y subsuperficial como una función del tiempo
G: roca granítica, A: roca andesítica, B: roca basáltica. Del trabajo citado determinaron una duración aproximada de meteorización en años de 10 000, 140 000 y >200 000, respectivamente

Fuente: Birkeland (1985).



» **Figura 17.** Anillos de meteorización en gravas de andesitas en depósitos aluviales del Japón central

Fuente: Oguchi (2013).

3.2.2.3. Identificación de evidencias de avenidas torrenciales recientes

Las evidencias de avenidas torrenciales como cobertura arenolimososa sobre cualquier superficie, marcas de erosión en la corteza de los árboles, sedimentos adosados en las paredes del canal, remanentes de represamientos, entre otros, permiten dar cuenta de la intensidad, magnitud y tipo de flujo que las generó (anexo 2). Cuando se tienen alturas de la lámina de agua georreferenciadas de un evento histórico y se sabe el nivel de referencia a partir del cual fueron tomadas respecto al cauce, se puede hacer estimaciones de la velocidad y la descarga en un tramo homogéneo de la zona de tránsito o depósito circundante al canal mediante métodos empíricos (p. ej., Cui *et al.*, 2013; García-Delgado, Machuca *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 2011). Entre esos métodos se encuentran:

3.2.2.3.1. Método de Wudu

Cuando la avenida torrencial histórica fue un flujo de detritos (granular o con alto contenido de sólidos) se puede implementar este método para determinar la descarga, como muestra la ecuación (8), donde n_c es el coeficiente de rugosidad, H_c la profundidad o altura de la lámina

de agua, J el gradiente del canal y A es el área de la sección transversal (Cui *et al.*, 2013; García-Delgado, Machuca *et al.*, 2019). El coeficiente de rugosidad se puede calcular para este método como muestra la ecuación (9). El área de la sección transversal dependerá de la forma del canal en el tramo donde se midió la altura de la lámina de agua; dicha forma se puede determinar a partir de un MDT en lo posible de alta resolución para tener mayor precisión en el cálculo o mediante el levantamiento topográfico de secciones transversales. La velocidad se puede calcular a partir de la descarga como muestra la ecuación (10).

$$Q = \frac{1}{n_c} \times A \times H_c^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{J} \quad (8)$$

$$\frac{1}{n_c} \times 18,5 \times H_c^{-0,42} \quad (9)$$

$$U = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Fuente: Cui *et al.* (2013); García-Delgado, Machuca *et al.* (2019).

3.2.2.3.2. Método de Chezy

También es usado para flujos con alto contenido de sedimentos detríticos y a partir del cual la descarga es obtenida mediante la ecuación (11), donde K_c es un factor que relaciona la profundidad o altura del flujo de detritos (H_c), según se muestra en la tabla 8 (Cui *et al.*, 2013; García-Delgado, Machuca *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 2011).

$$Q = K_c \times A \times H_c^{\frac{2}{3}} \times J^{\frac{1}{5}} \quad (11)$$

Fuente: Cui *et al.* (2013); García-Delgado, Machuca *et al.* (2019); Peng *et al.* (2015), y Tang *et al.* (2011).

» **Tabla 8.** Relación entre el coeficiente de velocidad (K_c) y la altura o profundidad del flujo de detritos (H_c)

H_c (m)	<2,5	2,75	3	3,5	4	4,5	5	>5,5
K_c	10	9,5	9,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0

Fuente: Peng *et al.* (2015).

3.2.2.3.3. Método de Manning

Este método se recomienda para flujos de lodos o hiperconcentrados de alta turbulencia (Takahashi, 2014) y define el cálculo de la descarga como se muestra en la ecuación (12) donde n es el coeficiente de rugosidad y R_h es el radio hidráulico. El coeficiente de rugosidad se puede obtener de múltiples maneras, sin embargo varios autores (Cui *et al.*, 2013; García-Delgado, Villamizar-Escalante *et al.*, 2019; Takahashi, 2014) lo determinan a partir de la tabla 9. Al igual que en los dos anteriores métodos, la velocidad se puede determinar a partir de la ecuación (10).

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{J} \quad (12)$$

Fuente: García-Delgado, Villamizar-Escalante *et al.* (2019); Takahashi (2014).

3.2.2.4. Inventario de movimientos en masa y puntos de interés a lo largo de la zona de tránsito

El inventario de movimientos en masa tiene como objetivo identificar aquellos cuyas masas desplazadas son acumuladas en el canal e incluir sus volúmenes en el cálculo del volumen por unidades de modelación, como se indica en la sección 3.2.2.1. De igual manera, con el desarrollo de esta actividad más el análisis multitemporal de movimientos en masa se debe identificar aquellos movimientos que pueden causar represamientos debido al volumen desplazado y a la morfología del canal. Precisamente esta última, en aquellos puntos de posible represamiento, se caracteriza por tener valles angostos limitados por laderas de altas pendientes donde un movimiento en masa o la carga de material vegetal puede obstruir fácilmente el canal. Además del índice SL, el análisis multitemporal de movimientos en masa, la encuesta a los habitantes



» **Tabla 9.** Asignación del coeficiente de rugosidad con base en las características del canal

Categoría	Características de canales/valles de flujos de detritos	Gradiente	Valores de <i>n</i> para varias alturas de flujo			
			0,5	1	2	4
Flujo de detritos no viscoso	Canales cerrados y empinados con escalones y contracciones; el material del lecho son rocas entre 0,5 y 2.	0,15-0,22	0,2	0,25	0,33	0,5
	Canal con muchas curvas y escalones; el material del lecho son rocas entre 0,3 y 0,5.	0,08-0,15	0,1	0,125	0,167	0,25
	Canal amplio y recto, material del lecho son rocas de 0,3 m, arena y grava.	0,02-0,08	0,0058	0,071	0,1	0,125
Flujo de detritos viscoso	Canal cerrado, empinado y meándrico; material del lecho son grandes cantos, arena y grava, formando bloques y escalones.	0,12-0,16	0,0056	0,067	0,083	0,1
	Canal relativamente recto, material de lecho son cantos, arena y grava.	0,08-0,12	0,0036	0,042	0,05	0,06
	Canal recto y amplio, material del lecho son rocas más pequeñas que 0,3 m, arena y grava.	0,04-0,08	0,0029	0,036	0,042	0,05

Fuente: traducido de Cui *et al.* (2013).

de la región y las características morfológicas del valle, como criterios para identificar posibles puntos de represamientos, deben seguir las recomendaciones expuestas en el capítulo 7. Para llevar a cabo el inventario de movimientos en masa se recomienda seguir las indicaciones de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017).

Por otra parte, con ayuda de las anomalías identificadas con el índice SL se deben georreferenciar y describir los puntos considerados de interés debido a cambios abruptos en la morfología del valle (valles abiertos a cerrados o viceversa), cambios abruptos en la dirección y pendiente del canal que lleven a avulsiones o procesos de erosión lateral, entre otros que sean considerados por el profesional. En aquellas zonas donde existan evidencias de erosión lateral se debe tomar el D50 de los depósitos expuestos a este tipo de proceso, como parte de los insumos necesarios para la evaluación de amenaza a escala 1:2000.

3.2.2.5. Encuesta de percepción del riesgo y descripción de eventos

Esta actividad permite obtener información clave para estimar la recurrencia, magnitud e intensidad de los eventos más recientes que han afectado a las comunidades. Esta fuente de información se considera importante porque además de permitir caracterizar los eventos en términos de alturas de la lámina de agua, tipo

de material movilizado, pérdidas humanas o materiales, también puede ayudar a identificar puntos donde han ocurrido represamientos y en algunos casos a una reconstrucción histórica a término corto de la formación de esas represas. Para llevar a cabo la encuesta se recomienda el formato propuesto en el anexo 4.

3.2.3. Integración de los resultados de la caracterización de avenidas torrenciales

En esta etapa se deben ajustar y complementar los resultados obtenidos en la recopilación y análisis de la información secundaria con base en la información obtenida del trabajo de campo. Es decir, se deben integrar los productos de tal manera que la información de campo ratifique y complemente las temáticas obtenidas a partir de fotointerpretación e información secundaria. La integración de los resultados consiste en la definición final de los productos descritos en la siguiente sección y en la 8.1.3.

3.3. Productos de la caracterización de avenidas torrenciales

De la caracterización de avenidas torrenciales, después de la integración de las etapas de recopilación y análisis de la información secundaria con la cartografía y análisis resultante del trabajo de campo, se obtienen los siguientes productos:

3.3.1. Inventario de avenidas torrenciales históricas

El inventario de avenidas torrenciales debe dar cuenta de la magnitud, intensidad, afectaciones y recurrencia de las avenidas torrenciales que han ocurrido en el área de estudio, además de recopilar los factores causales de los eventos. El inventario a partir de la información secundaria (sección 3.2.1.1.) debe ser complementado con la información obtenida de la encuesta de la percepción del riesgo y descripción de eventos realizada en la etapa del trabajo de campo (anexos 2 y 4). De esa integración y junto con la representación cartográfica del inventario histórico debe resultar un análisis de la historia fluvio-torrenciales del territorio según la disponibilidad de información.

3.3.2. Caracterización de avenidas torrenciales

La caracterización de avenidas torrenciales es un producto cartográfico equivalente a las unidades geológicas superficiales que debe contener la descripción de los depósitos con sus espesores, los macizos rocosos en términos de su calidad (GSI) y presencia de suelos residuales identificados a lo largo de la zona de tránsito y zona afe-rente al drenaje. En las zonas donde se presente erosión lateral es necesario que la descripción de los depósitos este acompañada de la estimación del D50. De igual manera, la zona de depósito debe incluir la identificación y cartografía de los eventos que constituyen las geoformas indicativas y que, según sus características, argumentan la temporalidad relativa. Además, los eventos caracterizados en la zona de depósito deben estar acompañados del D90 o, en su defecto, del Dmax de la fracción gruesa o armazón.

3.3.3. Geomorfología indicativa de aporte y depósito

Este producto corresponde a la cartografía de las geoformas indicativas presentes en la zona de tránsito y depósito de la cuenca de análisis. Las indicativas de aporte son parte de los insumos utilizados para la estimación de volúmenes de sólidos (sección 5.1.), y las indicativas de depósito son el insumo principal para la zonificación

de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales a partir de la geomorfología.

3.3.4. Zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales a partir de la geomorfología

Este producto es la representación cartográfica de las geoformas indicativas de depósito clasificadas según su temporalidad relativa, que a su vez define la categoría de amenaza que representa (sección 3.2.1.2.). Cabe resaltar que la zonificación final de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales será el resultado de la integración de la fotointerpretación realizada en la primera etapa de la caracterización (sección 3.2.1.) con la validación del trabajo de campo, según el criterio del experto, la delimitación de las geoformas se puede ajustar al ser validadas con las manchas de eventos recientes (<500 años) de avenidas torrenciales (sección 3.2.2.2.).

3.3.5. Descargas y velocidades a partir de las evidencias de avenidas torrenciales recientes

Si durante el trabajo de campo fue posible identificar alturas de lámina de agua de eventos recientes, este producto estará constituido por el cálculo de las velocidades y descargas a partir de los métodos empíricos propuestos en la sección 3.2.2.3. para cada sección transversal en la que se tenga información.

3.3.6. Inventario de movimientos en masa y análisis multitemporal y procesos de erosión a lo largo de la zona de tránsito

Este producto corresponde a la cartografía y la descripción de los movimientos en masa encontrados a lo largo de la zona de tránsito que junto con el análisis multitemporal son uno de los criterios para definir los puntos donde pueden ocurrir represamientos. La representación cartográfica del inventario también debe estar acompañada de rasgos que representen los procesos de erosión, haciendo especial énfasis en los tramos donde ocurre erosión lateral.

3.3.7. Puntos de interés

Este producto corresponde a la representación cartográfica de los puntos donde pueden ocurrir represamientos debido a los volúmenes de los movimientos en masa que llegan hasta el canal, y a la morfología de este. De igual manera, aquí estarán representadas las anomalías del índice SL, las características como cambios abruptos en el perfil longitudinal del canal y la presencia de erosión lateral que expliquen este comportamiento.

3.3.8. Volúmenes por unidad de modelación

Este producto corresponde a la subdivisión de los volúmenes materiales, depósitos y movimientos en masa encontrados a lo largo de la zona de tránsito en las unidades de modelación definidas en el análisis de detonantes (capítulo 4). Es decir que cada una de las unidades de modelación deberá tener asignado un volumen de sedimentos que será posteriormente utilizado en la estimación de volúmenes de sólidos que se incorporan al flujo (sección 5.1.).



Cuenca de la quebrada Batatalera
San Eduardo, Boyacá, 2019
Fotografía de Andrés Reyes



4

Análisis de detonantes



→ Río Jamundi
Jamundi, Valle del Cauca, 2020
Fotografía de Maudi Medina

Los factores que pueden detonar un evento de avenida torrencial tienen diversos orígenes y comportamientos, aumentando la dificultad y la incertidumbre al momento de analizarlos y modelarlos. Sin embargo, estos pueden verse desde una perspectiva sistémica. Es decir, inicialmente una avenida torrencial se rige por el material disponible en la zona o zonas de aporte que posteriormente se verán afectadas por los detonantes. Estos pueden ser vistos como una variable de extremos cuya magnitud está relacionada con una probabilidad de excedencia, permitiendo relacionar la magnitud del evento con algún periodo de retorno.

Según experiencias académicas nacionales e internacionales, hay evidencia de avenidas torrenciales detonadas por lluvia, deshielo, cambios en el nivel del agua (nivel freático), erosión de arroyos, cambios en el agua subterránea, terremotos, actividad volcánica, perturbación por actividades humanas o cualquier combinación de estos factores (Highland y Bobrowsky, 2008; USGS, 2020). No obstante, durante la recolección de información hecha sobre eventos de avenida torrencial ocurridos en el contexto histórico nacional (sección 3.2.1.1.1.), uno de los factores claves a identificar fueron los detonantes. Como resultado, la precipitación fue por mucho el más recurrente, ya sea precipitación de carácter acumulado (p. ej., precipitación antecedente al evento) o instantáneo (p. ej., intensidad de la precipitación muy alta al momento del evento).

Sumado a lo anterior está la gran cantidad de avenidas torrenciales que fueron provocadas por lluvia en la historia reciente. Se apunta al uso de este mecanismo de activación como el principal y único. En particular, son de especial importancia el valor del pico y la precipitación acumulada que ocurre antes del flujo (construcción de un

evento sintético), y el análisis de la precipitación crítica en relación con el tiempo (análisis intensidad/duración/frecuencia) (Caine, 1980; Johnson y Sitar, 1990; Johnson *et al.*, 1991; Johnson y McCuen, 1996).

En esta sección se expone el uso y la construcción de insumos y variables utilizados como detonantes para la modelación geotécnica, hidrológica y fluidodinámica. Estos tendrán asociada una escala espacial y temporal representativa que puede variar según el detalle de aplicación de la guía (1:2000 o 1:25 000).

La modelación hidrológica es la encargada de generar el detonante y entrada principal para las modelaciones geotécnica y fluidodinámica correspondiente al caudal líquido proveniente por un evento de precipitación de una duración y periodo de retorno determinado. Este detonante se usará en ambas escalas de aplicación de la guía metodológica (1:2000 y 1:25 000).

4.1. Unidades de modelación hidrológica, geotécnica, fluidodinámica

Se propone el empalme de disciplinas que describan física y cualitativamente los procesos naturales que detonan, transportan y depositan los materiales que forman parte de una avenida torrencial. Estas disciplinas son la geología-geomorfología, hidrología, geotecnia y fluidodinámica, las cuales tienen diferencias en el tipo de insumos, principios, escalas y productos, pero que acoplados de una forma adecuada hacen posible simular de manera cercana un proceso de este tipo.

De la anterior premisa surge la propuesta de dividir el área de estudio definida en la sección 2,

la cual hará las veces de dominio de modelación para la hidrología, geotecnia y fluidodinámica. Una vez definido el dominio, debe identificarse aquellas zonas de aporte de material a cauces que puedan a su vez ser transportadas por agua o que puedan causar represamientos. Por tanto, habrá dos tipos de fuentes de material:

- » Líquido: el agua en forma de caudal, aportada por el modelo hidrológico que simula el proceso lluvia-infiltración-escorrentía usando como detonante la lluvia.
- » Sólido: a) material sólido en suspensión generado por erosión pluvial (modelo hidrológico); b) material sólido por deslizamientos y remoción en masa ocurrida en laderas y bancas ribereñas aportadas por el modelo geotécnico.

La propuesta consiste en ejecutar el modelo hidrológico y geotécnico de manera semidistribuida. Es decir, el área de estudio será dividida en unidades de modelación, que en su punto de concentración se acoplarán con el modelo fluidodinámico entregando los productos generados a partir de las modelaciones explicadas en los siguientes capítulos. Con el fin de construir una división óptima, se recomienda tomar como base la cuenca contribuyente explicada en la sección 2.2.2. y los siguientes factores:

- » Cambios abruptos de gradientes topográficos.
- » Cambios litológicos.
- » Pendientes altas en laderas y valles.
- » Evidencias de reconocimiento de campo.

Se deben tener en cuenta documentos, estudios y testimonios sobre eventos anteriores que indiquen sitios claves (aportes de material, obstáculos, represamientos, cambios abruptos de dirección, entre otros) que puedan ser representados con el modelo fluidodinámico y que no queden contenidos dentro de las unidades de modelación, ya que puede diezmar velocidades y volúmenes, sesgando los resultados.

Adicionalmente se recomienda delimitar y/o contemplar centros poblados y redes de drenaje a partir de insumos oficiales, como los pro-

puestos en la sección 2.4., particularmente los más recientes y detallados que se dispongan en la zona (escala máxima recomendada 1:25 000).

Este proceso debe ser iterativo y requiere del trabajo conjunto entre los profesionales de cada una de las disciplinas involucradas, con el fin de lograr una modelación eficiente y correcta. La división del área de estudio en unidades de modelación tiene únicamente este objetivo y no representa limitaciones cartográficas para la construcción de un mapa de zonificación de amenaza.

4.2. Eventos extremos y cambio climático

En el país, la entidad que ha liderado y desarrollado estudios sobre el cambio climático y cambios en la precipitación es el Ideam, principalmente a través de su *Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de modelos climáticos globales* (Oviedo y León, 2010). Esta tiene el objetivo de brindar a la comunidad científica, académica y a las personas interesadas, la información mínima que permita la estimación de escenarios de cambio climático ajustados a un área de estudio particular, con unos estándares nacionales definidos. Su construcción se basó en los estudios hechos por Armenta y Ruiz (2010). Sintetizando lo desarrollado, se realizaron simulaciones del clima con base en los escenarios propuestos por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), los cuales tienen en cuenta las posibles emisiones futuras de CO₂, proyectando el comportamiento global de la humanidad respecto al progreso tecnológico y el uso de combustibles fósiles. Los resultados de las modelaciones son usados para evaluar índices de eventos extremos, muy comunes en este ámbito y de origen estadístico. También, corresponden a un indicador de la tendencia positiva, negativa o neutra de la variable a analizar dentro de un periodo seleccionado (tabla 10).

La guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático presenta resultados nacionales a nivel de estaciones de medición de la precipitación. Esta fue elaborada

con el fin de modelar el cambio de las precipitaciones y temperaturas diurnas y nocturnas. De los resultados se puede concluir que los índices de precipitación extrema tienden a disminuir en la mayoría del país, evidente en las tendencias negativas en departamentos del centro y suroccidente colombiano (región Andina). Sin embargo, hay algunos departamentos que presentan puntualmente tendencias positivas en los índices que pueden asociarse con eventos torrenciales como el R20mm, R95P y R99P (tabla 10). Adicionalmente, también es importante tener en cuenta el nivel de significancia de las pruebas estadísticas. Estos valores de significancia no permiten, en general, concluir sobre la tendencia observada en los índices de precipitación extrema en gran parte del territorio colombiano (Armenta y Ruiz, 2010).

Estudios más actuales, como Mena-Palacios *et al.* (2016) y Pabón Caicedo (2012), desarrollaron ejercicios de modelación del cambio climático similares, aplicados al contexto nacional. Estos estudios centran su atención en el análisis de la precipitación extrema en Colombia y su teleconexión con fenómenos macroclimáticos como el ENSO (El Niño Southern Oscillation – El Niño Oscilación del Sur). El ENSO es, de forma muy resumida, anomalías en las temperaturas superficiales del océano Pacífico tropical, que tienen una alta incidencia sobre las anomalías de precipitación en el territorio colombiano (Giraldo y Trujillo, 2018). Los autores concluyen igualmente que existe una clara tendencia negativa en la duración de la temporada de lluvias, principalmente en la zona Andina y el suroccidente colombiano. Sin embargo, los niveles de

significancia siguen sin ser representativos y no aportan certeza sobre los resultados.

Ya divisado el contexto, trabajos, alcances y resultados de la modelación del cambio climático a nivel nacional y el carácter oficial de las instituciones que los han publicado, se considera que procesos de este tipo no aportarían mejor información para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales, puesto que los resultados no serán significativos modificando el detonante propuesto. La incertidumbre asociada al cambio de cobertura, el cambio del uso del suelo y el crecimiento poblacional inducen mayores riesgos futuros que los que pueda tener el cambio de los eventos extremos de precipitación debido al cambio climático. Lo anterior indica la constante actualización a la que debe ser sometida la aplicación de guías de este tipo, orientadas a la amenaza en escalas temporales y espaciales de carácter local.

4.3. Información de la precipitación

La precipitación es la variable que cumple el papel de detonante en esta guía, siendo entonces la entrada principal del modelo hidrológico encargado de simular la producción de caudal de cada unidad de modelación. La precipitación se caracteriza por escalas temporales cortas de máximo seis horas. Este fenómeno es tratado en forma de evento de tormenta. Sin embargo, la duración es solo uno de los factores determinantes. El paso siguiente es relacionar la intensidad o magnitud que pudo presentarse y la representatividad para la historia de eventos en el lugar

» **Tabla 10.** Índices estadísticos del programa *R-climdex* utilizados en análisis de cambio en la precipitación extrema

Criterio	Descripción	Índice
Asociados al comportamiento de la precipitación extrema	Número de días en un año con lluvia mayor a 10 mm.	R10mm (# días)
	Número de días en un año con lluvia mayor a 20 mm.	R20mm (# días)
	Número de días en un año con lluvia mayor al extremo superior normal de precipitación de la estación.	Rnnmm (# días)
	Precipitación total anual de días > percentil 95.	R95P (mm)
	Precipitación total anual de días > percentil 99.	R99P (mm)
	Precipitación total anual/ días con lluvia al año con precipitación > 1,0 mm.	SDII (mm/día)

Fuente: Armenta y Ruiz (2010).

de estudio. Es necesario analizar las frecuencias que indique la recurrencia de una lluvia con una intensidad y duración dada. Por lo anterior, se propone generar el detonante a partir de un estudio de intensidad, duración y frecuencia de la precipitación. Una guía para llevar esto a cabo se expone en el procedimiento del diagrama de flujo de la figura 18.

4.3.1. Curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) elaboradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

La curva intensidad-duración-frecuencia (IDF) permite determinar la intensidad (I) o magnitud de una lluvia para una duración (D) determinada (que usualmente pueden ir desde los 30 minutos hasta 360 minutos —6 horas—), y que está relacionada con una probabilidad de excedencia vinculada al periodo de retorno.

Durante 2016, el Ideam, en convenio con la Universidad Nacional de Colombia, hizo la actualización de las curvas IDF para 110 estaciones con información disponible hasta 2010 (Rodríguez *et al.*, 2016); es decir, las estaciones en donde fue posible llevar a cabo un análisis de manera acertada, partiendo de un catálogo de lluvias completo con diferentes duraciones y mínimo 30 años de información histórica de aguaceros. Como resultado, se construyeron curvas para los periodos de retorno de 2,33; 5; 10; 25; 50, y 100 años, entregando esta información al público en formato .pdf disponible en Ideam (2020).

El formato en el que el Ideam dispone las curvas permite construirlas para las duraciones que el modelador desee, dado que se entregan los parámetros de la ecuación propuesta para unos periodos de retorno establecidos (2,33; 5; 10; 25; 50, y 100 años). Se propone la extrapolación utilizando la ecuación indicada en el insumo o el ajuste de las curvas a una función de probabilidad para la obtención de los valores de intensidad correspondientes a periodos de retorno más altos (300 y 500 años).

Cabe resaltar que solo 130 estaciones en el país cuentan con este análisis IDF, ya que pocas cumplen con el requisito de medir la precipitación a resoluciones temporales subhorarias y

tener un catálogo de lluvias amplio. Dado el caso en el que la estación adecuada para el análisis no se encuentre dentro de este catálogo de curvas IDF, se deben efectuar cálculos indirectos para construir la curva IDF, como la desagregación de datos desde una resolución temporal mayor a resoluciones temporales subdiarias.

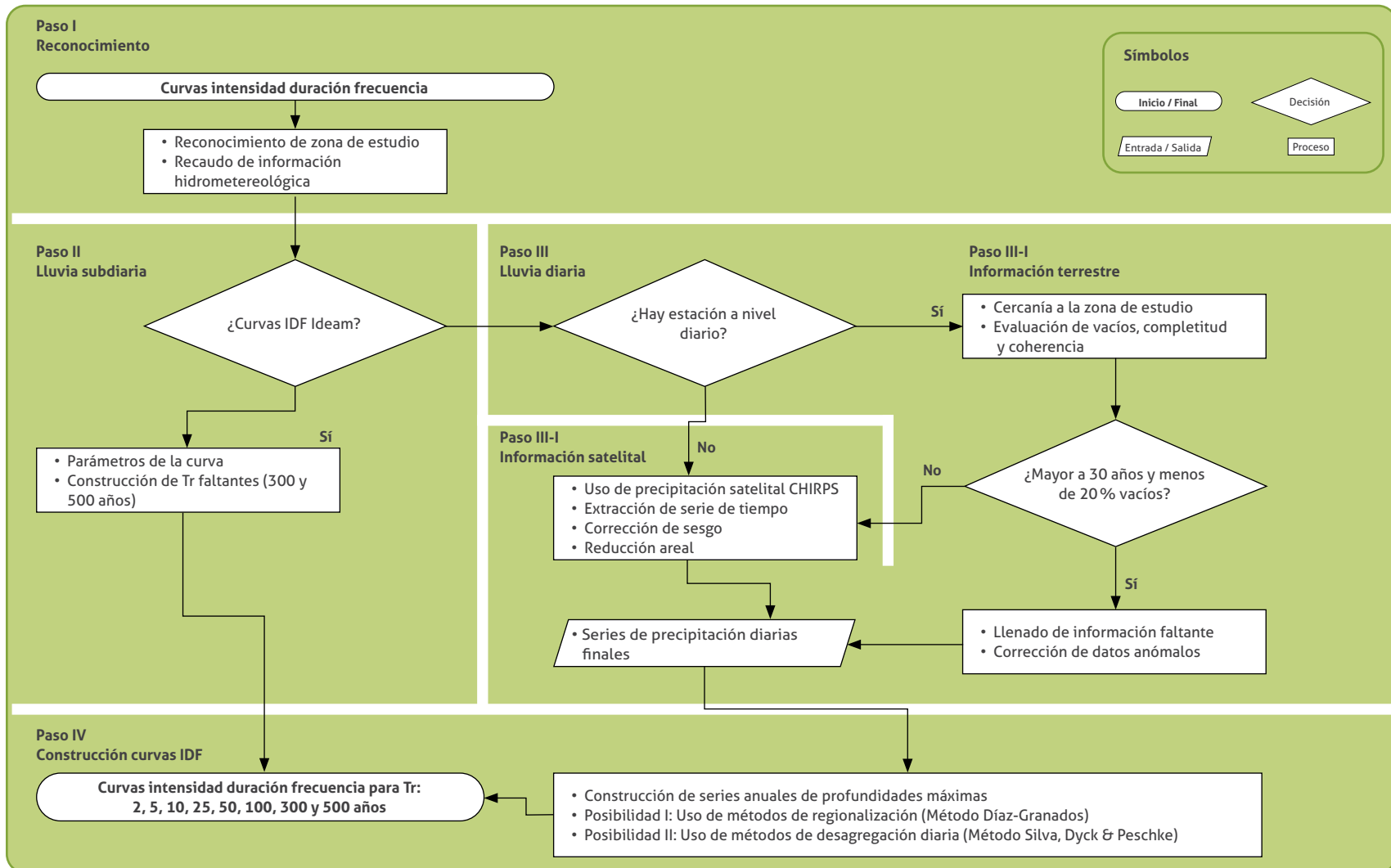
La selección de una estación presente en el catálogo de curvas IDF estará en función de la cercanía o la existencia de esta dentro de la zona de estudio (caso dependiente). El concepto de *cercanía* de la estación es subjetivo del modelador, puesto que requiere un análisis de la orografía o de la similitud del piso térmico para llevar a cabo esta selección, así como opciones más complejas tipo polígonos de Thiessen y correlaciones de series de tiempo.

4.3.2. Precipitación diaria de estaciones

Si no hay una estación con curvas IDF construida por el Ideam para el área de estudio, se recomienda analizar estaciones de medición que tengan una resolución temporal de toma de datos a nivel diario y periodos de registro de datos mayores o iguales a 30 años, según recomendaciones dadas por la Organización Meteorológica Mundial (2011, pp. 4-16).

- » Para obtener una guía estadística hidrológica precisa y confiable sobre posibles eventos, es necesario utilizar un conjunto de datos que incluya una muestra representativa de tantos eventos diferentes como sea posible (mínimo 30 años).
 - Cuanto más largo sea el periodo de registro, mayor será la probabilidad de capturar el rango de posibles eventos.
- » Si es posible, evitar estimar valores de precipitación del periodo de retorno que sean mayores que el doble de la longitud del registro.
 - Ejemplo: la confianza sobre una estimación de precipitación de 500 años es baja, a menos que se tengan 250 años de datos.

Esta información tiene el fin de usar las profundidades máximas en 24 horas anuales e implementar métodos de regionalización o desagregación diaria para la construcción de curvas IDF.



» **Figura 18.** Procedimiento para la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia propuesto para la guía metodológica

En el diagrama de flujo de la figura 18 se propone una revisión del porcentaje de vacíos en la serie de datos, que no exceda un 20 % de la longitud total de la serie y que no falten los valores de más de tres años consecutivos. Este porcentaje puede variar según sean las particularidades de la serie de tiempo y sea viable el llenado. El Ideam tiene a disposición del público un portal web de datos llamado DHIME (Ideam, 2020), el cual tiene la opción de descargar las series temporales de precipitaciones máximas en 24 horas para cada año, en aquellas estaciones que ya cuentan con el cálculo de esta variable, procedimiento realizado por la Subdirección de Hidrología de dicha institución.

La información que proviene directamente del Ideam tiene un tratamiento previo de datos anómalos; sin embargo, se recomienda, según sea la fuente, una revisión de estos y atención especial a aquellos extremos, pues estos son los que van a caracterizar los máximos anuales necesarios para el análisis de frecuencias. Para llevar a cabo este filtrado de datos históricos es posible utilizar varios métodos. En concreto, métodos como el de momentos ponderados ajustados históricamente, el método de máxima verosimilitud, el algoritmo de los momentos esperados y el método no paramétrico suelen ser herramientas que arrojan resultados adecuados al momento de filtrar datos de este tipo (England *et al.*, 2003; Griffis *et al.*, 2004; Reis *et al.*, 2003).

Respecto a estrategias de llenado, existen varias. Para este caso, se propone utilizar el producto de precipitación satelital CHIRPS: se obtiene la serie de datos del pixel correspondiente a la ubicación de la estación, se realiza una corrección del sesgo de los datos CHIRPS (Piani *et al.*, 2010) y una evaluación sobre la distribución de vacíos y nulos en ambas series. De esta manera se evalúa que la serie CHIRPS sea adecuada para un llenado por reemplazo de los vacíos en la serie de la estación de medición.

4.3.3. Precipitación satelital CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)

Se parte del supuesto que el área de estudio no tiene una estación disponible, ni curva IDF ge-

nerada por Ideam. Entonces, se propone el uso de precipitación captada satelitalmente o productos generados por reconstrucciones climáticas. El producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) está disponible al público desde 2014, fue creada y es administrada por el U.S. Geological Survey (USGS) y University of California, Santa Bárbara (UCSB). Este producto tiene información de precipitaciones desde 1981 hasta el presente, con cobertura en áreas continentales desde la latitud 50°S a la 50°N, presencia en todas las longitudes con una resolución espacial de 0,05° (aproximadamente 5,4 km) y resolución temporal mínima diaria, la cual es útil para el alcance de la metodología propuesta.

Existen estudios que validan el uso de CHIRPS sobre el territorio colombiano, concluyendo que conserva características importantes de la precipitación como la media y la estacionalidad en escalas diarias, mensuales y anuales. Sin embargo, la varianza está mejor representada en las escalas mensual y anual a diferencia de la diaria, generando sesgo de subestimación (Urrea *et al.*, 2016). Por lo anterior, es propuesto como el principal insumo al momento de obtener una serie de precipitación adecuada para generar profundidades máximas en 24 horas anuales cuando hay ausencia de estaciones.

Datos de origen satelital como los de CHIRPS presentan errores sistemáticos debido a una imperfecta conceptualización de la discretización de los promedios utilizados en las celdas (pixeles del mapa); por ello, la importancia de realizar una corrección mediante métodos que permiten reducir el sesgo en sus estadísticos apoyándose en estaciones terrestres (Teutschbein y Seibert, 2012). Un resumen que enumera fortalezas y debilidades de varios métodos de corrección del sesgo es realizado por Piani *et al.* (2010), dentro del cual se recomienda el ajuste por funciones de ecuación entre histogramas de ambas series datos, siendo un método sencillo y ligero computacionalmente (figura 18, paso III-II).

Como el análisis IDF es de carácter puntual, es decir, sobre una serie de tiempo que representa un punto de medición en el espacio, es necesario convertir la información CHIRPS de carácter espacial (pixel con una resolución aproximada

de 5,4 km) a carácter puntal, por el método de la reducción areal. Este método usa un factor de área que transforma los valores espaciales de precipitación a valores puntales, con resultados como el aumento las intensidades acercándose a valores captados por una estación en tierra (Svensson y Jones, 2010) (figura 18, paso III-II).

4.4. Análisis del detonante lluvia

A continuación, se presentará el procedimiento propuesto para el tratamiento de los insumos y construcción de los detonantes usados en esta guía. Particularmente la definición de los periodos de retorno (base de los escenarios de modelación y de amenaza), el procedimiento para la construcción de las curvas IDF de precipitación, la construcción de eventos sintéticos de lluvia desde las curvas IDF (detonante) y el procedimiento, recomendaciones y resultados del modelo hidrológico para la simulación del caudal debido a escorrentía (detonante).

4.4.1. Definición de escenarios (periodos de retorno)

Los sistemas hidrológicos se ven afectados ciertas veces por eventos extremos, que pueden ir desde tormentas severas, crecientes, hasta los eventos extremos opuestos como los producidos por las largas temporadas sin lluvias (sequías). Estos tienen una magnitud que está inversamente relacionada con la frecuencia de ocurrencia, es decir, que eventos de magnitudes extremas ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. Un análisis de frecuencia de información hidrológica busca relacionar la ocurrencia de eventos extremos con la magnitud a la que puedan presentarse usando distribuciones de probabilidad (Chow *et al.*, 1994).

Para obtener una estadística hidrológica precisa y confiable sobre posibles eventos, es necesario utilizar un conjunto de datos que incluya una muestra representativa de tantos eventos diferentes como sea posible (mínimo 30 años propuestos para esta guía, sección 4.3.), puesto que cuanto más largo sea el periodo de registro,

mayor será la probabilidad de capturar el rango de posibles eventos. Los periodos de retorno comunes en hidrología incluyen de 2,33; 5; 10; 25; 50; 100, e incluso 500 años. Existen recomendaciones para evitar estimar magnitudes asociadas con periodos de retorno mayores que el doble de la longitud del registro. Sin embargo, esto se puede contrastar con la variable que se quiera analizar (precipitación, eventos de crecientes, eventos de inundaciones, temperaturas, etc.) (American Society of Civil Engineers, 1996).

Los escenarios en términos de periodos de retorno propuestos para esa guía metodológica son de 2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años. El mínimo está dado por un criterio usual en modelación de eventos extremos, en donde el uso de la distribución de probabilidad Gumbel es común, y se suele calcular el periodo de retorno para un evento que corresponde con el valor esperado para dicha distribución. Considerando lo anterior, resulta que la probabilidad acumulada de un valor x corresponde con la media de la distribución y su respectivo periodo de retorno (ecuación 13).

$$P = e^{-e^{-0,577}} \Rightarrow \frac{1}{P} = T = 2,33 \text{ años} \quad (13)$$

Respecto al umbral máximo de 500 años, es elegido para entrar en concordancia con la norma colombiana de diseño de puentes (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2015), norma que explica que estructuras de este tipo normalmente se ven afectas por eventos de avenida torrencial; también parte del estado límite de eventos extremos que se debe considerar para garantizar la supervivencia estructural de un puente durante un sismo o inundaciones severas, posiblemente bajo condiciones de socavación. Citando a la norma ya nombrada, “la evaluación hidráulica necesariamente involucra muchas suposiciones. Entre las más importantes están los coeficientes de rugosidad y la proyección de magnitudes a largo plazo, v. gr., la inundación de los 500 años u otras grandes inundaciones” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2015).

4.4.2. Construcción de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF)

La aproximación más conocida y usada en ingeniería para hacer un análisis de frecuencias sobre la precipitación son las curvas IDF. Estas serán la forma en la que la variable hidrológica seleccionada como detonante (precipitación) puede ser caracterizada a través de la intensidad, de la duración y de su frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Las IDF son ideales al momento de proponer escenarios independientes para la modelación y paso previo a la construcción de eventos sintéticos de precipitación como los hietogramas de tormentas.

El insumo principal propuesto para esta guía son las curvas IDF construidas por el Ideam (sección 4.3.1.). En caso de no tener esta información disponible, se debe optar por la construcción de estas curvas con la información disponible, la cual, en este caso, es la lluvia a nivel diario, ya sea de estaciones en tierra o en su defecto precipitación captada satelitalmente (sección 4.3.2. y 4.3.3.), dentro de estos pasos se ha indicado el llenado o corrección necesaria según sea el caso.

Es de anotar que al utilizar información con una escala temporal más gruesa (p. ej., diaria) que la escala que estas curvas IDF buscan representar (p. ej., eventos de tormenta de pocas horas), se pierde un porcentaje de asertividad final del producto. Principalmente, se genera una subestimación de los valores de intensidades que componen la curva IDF, manifestándose finalmente como menos profundidad total de precipitación. Sin embargo, continúan siendo útiles bajo el contexto de ausencia de información. Se proponen varios métodos que emplean ecuaciones que permiten estimar estas curvas a partir de información pluviométrica (nivel diario) usando los resultados de curvas IDF construidas a partir de información pluviográfica (nivel subdiario).

El primer método usa curvas ubicadas en diversas zonas del territorio colombiano que, junto a los resúmenes multianuales pluviométricos de estas, y el uso de las principales ecuaciones propuestas en la literatura, establecieron nuevas ecuaciones para cuatro grandes regiones de Colombia, que estarán separadas por su ré-

gimen climático y por su orografía. El método, conocido por el nombre de su autor, Mario Díaz-Granados, o como *método simplificado* (Vargas y Díaz-Granados, 1998), es ampliamente usado por la ingeniería colombiana, citado en documentos como el *Manual de drenaje para carreteras*, del Instituto Nacional de Vías (Flórez y Bolaños, 2009).

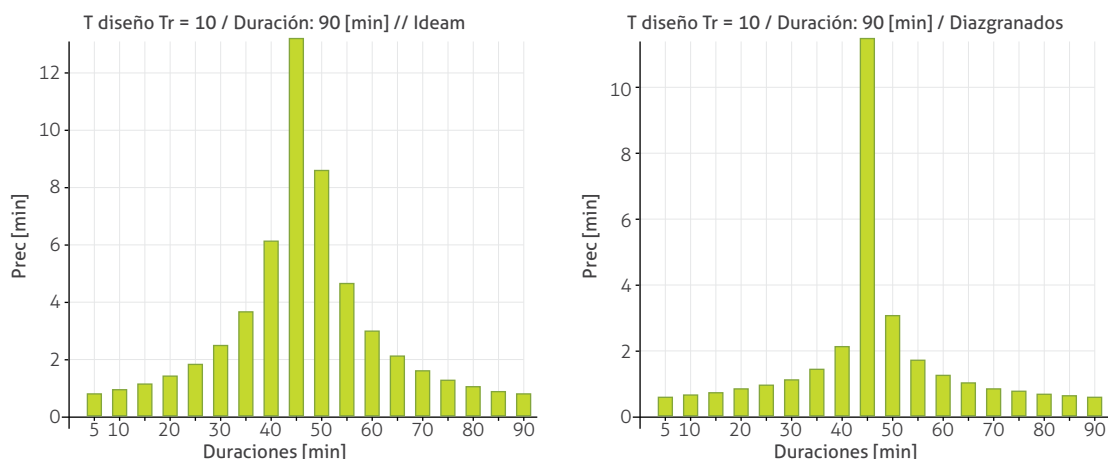
El segundo método también usa la información pluviométrica a nivel diario y particularmente los valores máximos en 24 horas. Estas son metodologías que proponen el uso de factores que relacionan magnitudes de precipitación a nivel diario con la magnitud de duración subdiaria que se desee. Entre estos está el método propuesto por Gustavo Silva, el cual también inicia con el planteamiento de la escasez de información a nivel subdiario, de la utilidad y limitantes (para cuencas menores a 100 km² de área y duraciones mínimas de 15 minutos) (Silva, 1987). Otro método propuesto por Dyck y Peschke (en Caspers, 1986) permite estimar la lámina e intensidad de lluvia para cualquier duración en función de la precipitación máxima en 24 horas con limitantes como la subestimación y aguaceros de mínimo 20 minutos.

4.4.3. Hietograma de diseño para cada periodo de retorno

Con el fin de tener una consideración sobre la distribución temporal del evento de lluvia, se propone el uso del hietograma de precipitación de diseño utilizando las relaciones IDF, dado que en ocasiones no es suficiente un único dato de precipitación máxima a un periodo de retorno determinado, especialmente para un modelo lluvia-infiltración-escorrentía que involucra varios fenómenos de variabilidad temporal alta.

Existen varios métodos para generar el hietograma de diseño. Entre ellos, uno de los más utilizados es el de bloque alterno (Chow *et al.*, 1994, p. 477), el cual usa de una forma simple las curvas IDF. El hietograma generado por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en los intervalos de tiempo sucesivos de una duración homogénea.

Inicialmente debe seleccionarse un periodo de retorno, el cual definirá la curva IDF a utilizar. La intensidad es leída de esta curva para



» **Figura 19.** Hietogramas de diseño en la estación Ideam El Cucharero para un periodo de retorno de 10 años, una duración de 90 minutos y pasos de tiempo de 5 minutos. Hietograma generado de IDF Ideam (izquierda), Hietograma generado de IDF con método Díaz-Granados (derecha).

cada una de las duraciones. La profundidad de precipitación es aquella generada de la multiplicación de la intensidad y la duración para cada paso de tiempo. Si se toman las diferencias entre valores sucesivos de estas profundidades, se encuentra la cantidad de precipitación para cada paso de tiempo.

En la figura 19 se presentan dos hietogramas construidos con el método del bloque alterno. El primero de ellos (izquierda) fue elaborado a partir de las curvas IDF que construyó el Ideam con datos de pluviógrafo; el segundo (derecha) es el hietograma generado con las curvas IDF regionalizadas del método Díaz-Granados. Es de notar que el pico del segundo método es más abrupto respecto al resto de profundidades generadas. Sin embargo, la magnitud máxima no es muy diferente entre métodos. Si se analiza la lluvia de manera acumulada, la profundidad de precipitación será mayor en la tormenta generada desde las curvas construidas por el Ideam. Se evidencian desventajas en los métodos de desagregación, resaltando el porqué deben ser segundas opciones.

4.4.4. Modelo hidrológico

Un aspecto fundamental en el estudio de la hidrología es la comprensión de la interacción entre los diferentes procesos y componentes físicos del ciclo hidrológico, para poder generar resultados confia-

bles que sirvan como base para la toma de decisiones o el acople con otras ramas de la ingeniería. La modelación hidrológica tiene alcances variados que comprenden métodos con diversas aplicaciones, unos más complejos que otros, y objetivos específicos de acuerdo con la realidad y requerimientos que se tengan. No obstante, los resultados de estos modelos, al ser la hidrología una disciplina sujeta a incertidumbre, están limitados por la falta de fuentes de información, mediciones deficientes, aleatoriedad climatológica, intervención humana y muchos otros factores. En este caso la modelación tiene como objetivo generar la entrada de masa en términos de caudal a los modelos hidrodinámicos y geotécnicos. Esto porque la modelación hidrológica permite convertir la lluvia en escorrentía bajo hipótesis basadas en la experimentación y la física.

En las secciones 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3 se explicaron las fuentes y construcción de la precipitación como insumo principal de modelo hidrológico, el cual será ingresado a este con una variación temporal dada por los hietogramas de diseño para cada periodo de retorno propuesto (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500). La lluvia puede considerarse homogénea sobre toda el área de estudio; sin embargo, a criterio del modelador, según sea la división en unidades hidrológicas que se haga, el tamaño del área de estudio y reportes o indicios de su comportamiento en estudios previos puede optarse por la activación de solo

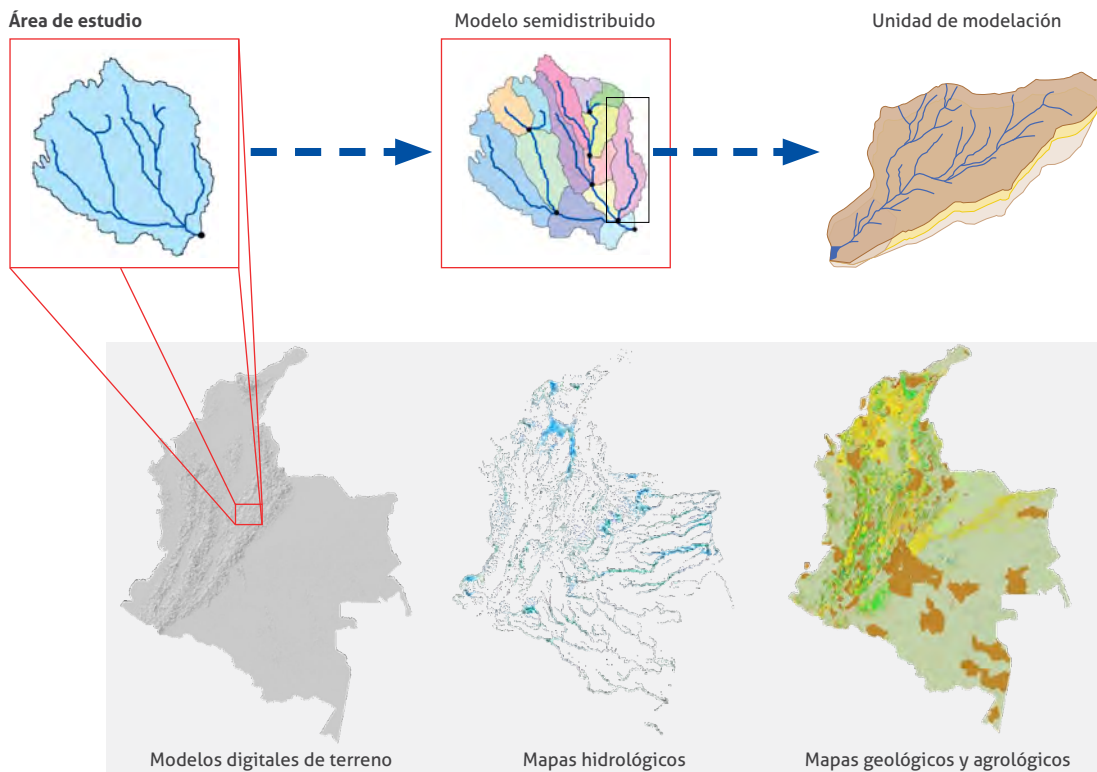
algunas zonas, como la cuenca alta o las unidades de modelación de iniciación identificadas.

Es de anotar que las propuestas sobre la modelación hidrológica no es una camisa de fuerza respecto a qué modelo utilizar. Por el contrario, se realizarán recomendaciones claras de los procesos hidrológicos adecuados para un correcto acople con las ramas de geotecnia, geología y fluidodinámica, con el propósito de representar de una manera eficiente un evento de avenida torrencial.

Se propone un modelo con aproximación inicial de tipo semidistribuido, retomando la subdivisión del área de estudio en unidades de modelación en función de una cartografía de drenajes oficial. Los insumos para llegar a este punto de partida serán el modelo digital de terreno (sección 2.6.), mapas hidrológicos que den una guía de los sistemas a los que pertenece el área de estudio, mapas agrológicos que identifiquen el uso y la modificación de las coberturas al interior de esta. De aquí se genera el acople inicial con los demás componentes de modelación al momen-

to de seleccionar los puntos de concentración de las unidades de modelación generadas (sección 4.1.). Un esquema general que describe este proceso está en la figura 20.

La anterior aproximación a la modelación de carácter semidistribuida fue inspirada en modelos ejecutables construidos como WEPP, KINEROS y SWAT, comparados y analizados en Chahinian *et al.* (2005). Sin embargo, estas aproximaciones están construidas para unas necesidades y usos concretos (escalas temporales mayores a la diaria, producción de sedimentos, influencias de coberturas en la humedad del suelo). Por tanto, deben ser analizados evaluando su congruencia con el objetivo principal de la metodología, la cual busca, más allá de una compleja modelación hidrológica, el vínculo adecuado con otras disciplinas que describen procesos físicos que también forman parte de una avenida torrencial. Un buen ejemplo de esto es lo desarrollado en la *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa escala detallada* (Ávila *et al.*, 2016).



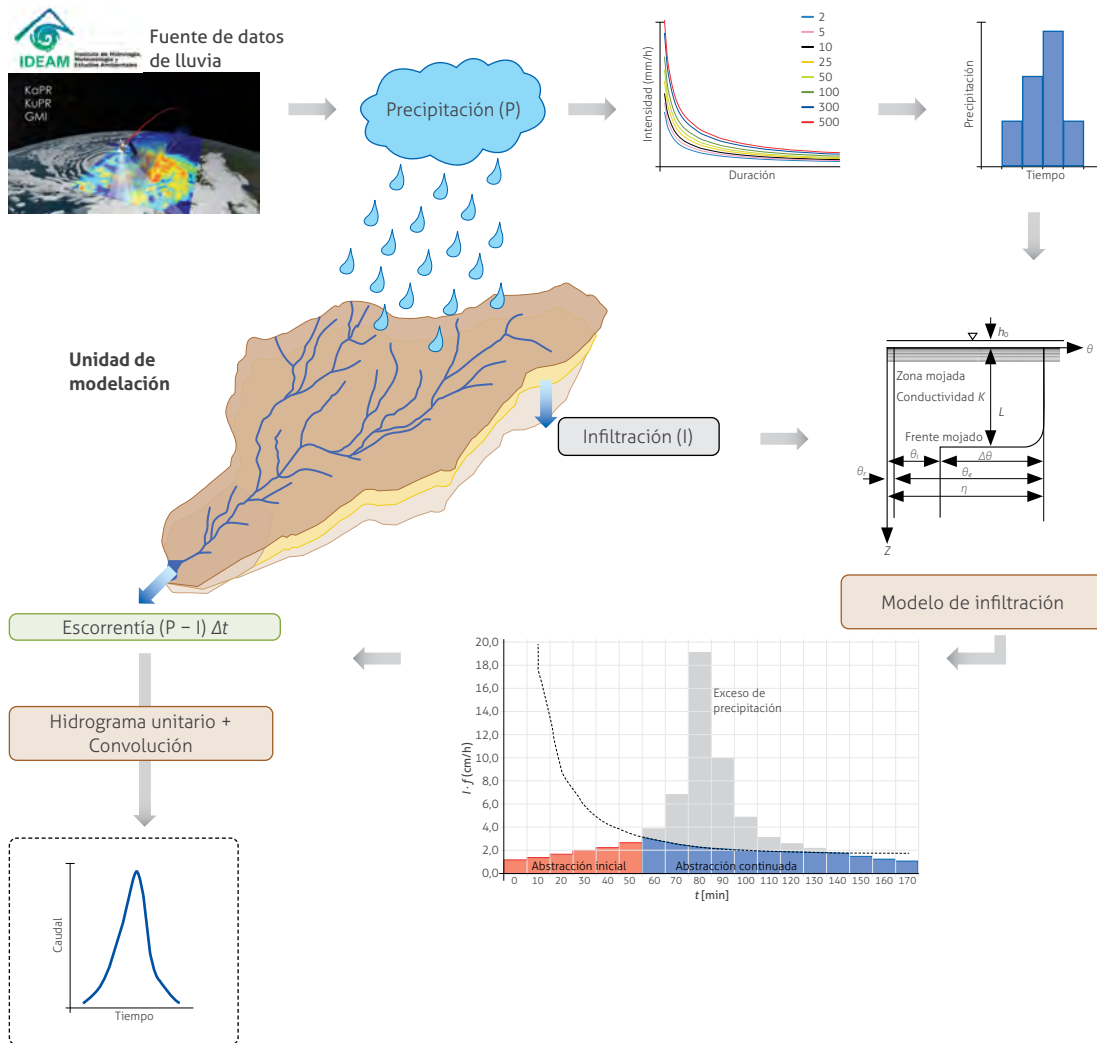
» **Figura 20.** Aproximación semidistribuida de la modelación hidrológica

En ese documento, mediante una aproximación agregada utilizando también unidades de modelación, se buscó simular la variación del nivel freático en zonas susceptibles a presentar movimientos en masa, utilizando como detonante la precipitación, y como mecanismo de falla la variación de las presiones de poros.

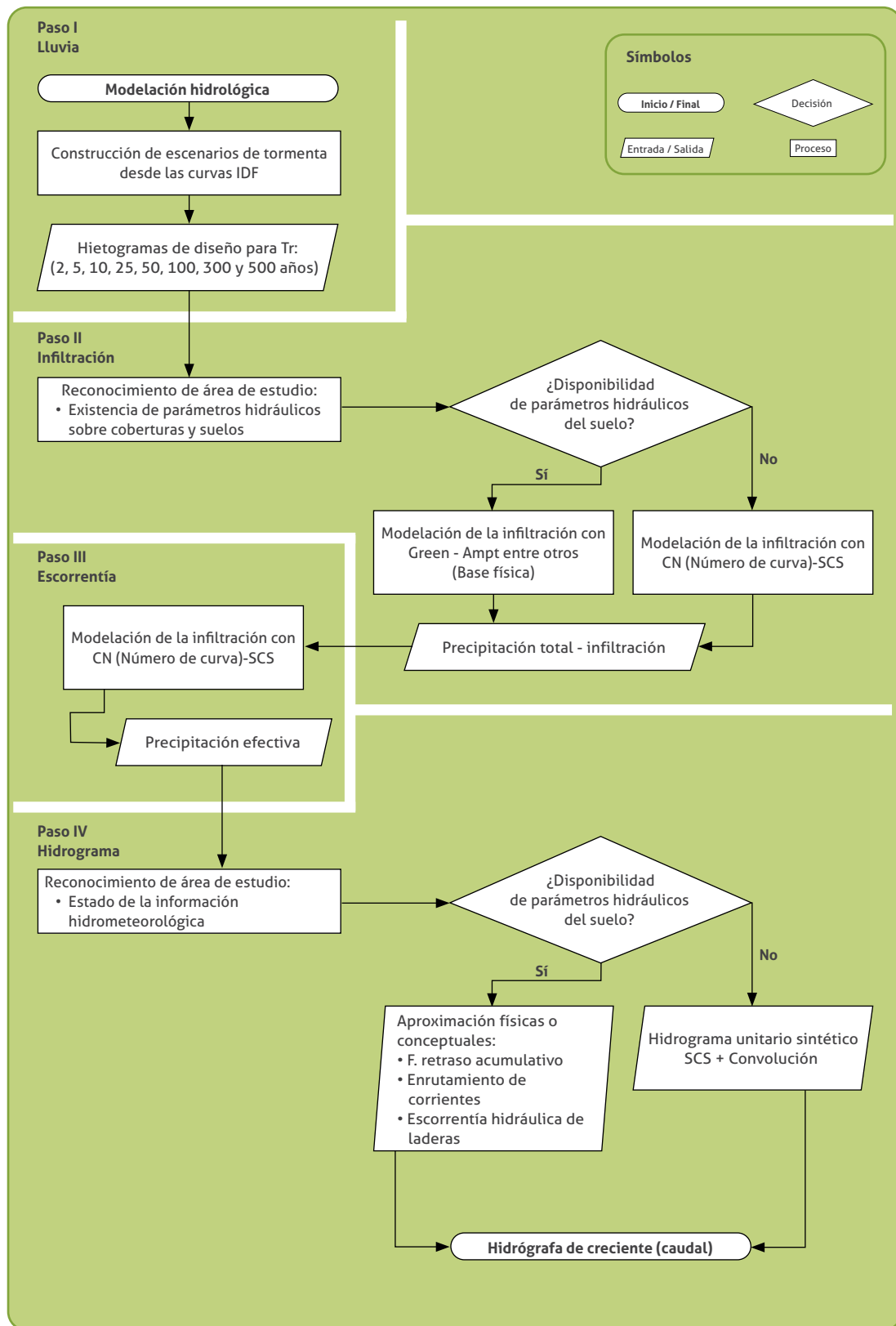
Dentro de cada unidad de modelación construida al momento de generar la aproximación semidistribuida del área de estudio, se propone realizar un análisis de carácter agregado, como el que se muestra conceptualmente en la figura 21. De esta figura se puede ver cómo las entradas para simular el proceso lluvia-infiltración-esco-

rentía son la precipitación, una red de drenaje, un modelo de elevación digital, atributos de litología y características de coberturas. Las salidas son la lámina de escorrentía (precipitación efectiva), lámina de infiltración y la producción de caudal en forma de hidrógrafa. El procedimiento propuesto está a manera de diagrama de flujo en la figura 22. Inicialmente se busca definir los insumos iniciales, su razón y función dentro de la modelación sugerida (tabla 11).

La tabla 11 precisa el insumo necesario (columna izquierda) de manera global. En la parte derecha se explica su razón y, por ende, función, lo cual está ligado con el proceso natural que se



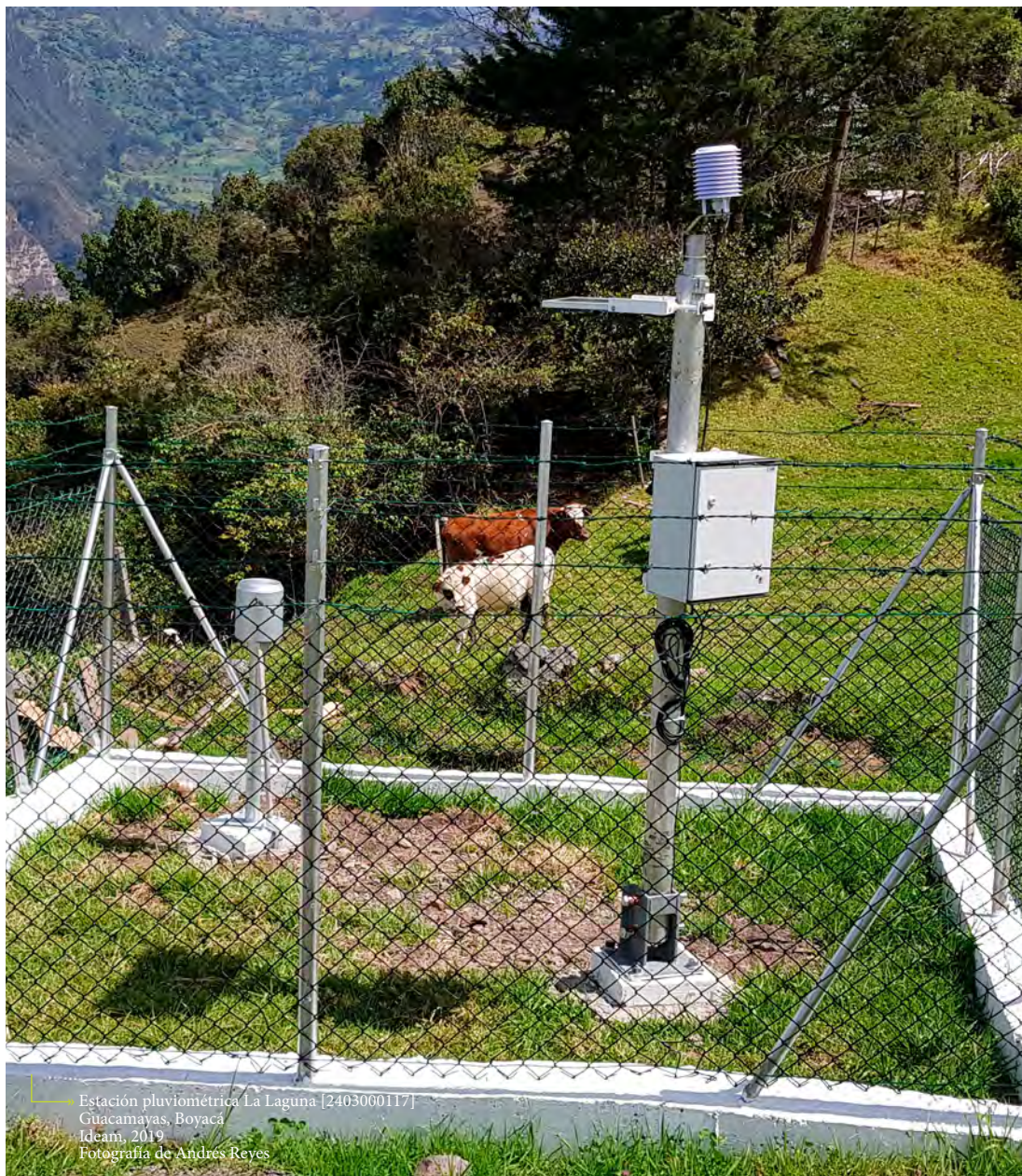
» **Figura 21.** Representación esquemática de la modelación hidrológica



» **Figura 22.** Procedimiento para la modelación hidrológica propuesto a nivel agregado

» **Tabla 11.** Función y razón de insumos propuestos para modelación hidrológica

Insumos modelación hidrológica	
Insumo	Función dentro de modelación
Área de estudio, unidades de modelación	Dominio de modelación. Puntos de acople con la fluidodinámica y geotecnia.
MDT	Parámetros topográficos (pendientes, función de ancho, índice topográfico). Generación de corrientes, tiempo de concentración, tuneo HU sintético.
Hietogramas de diseño	Escenarios de modelación. Detonante de la hidrógrafa de creciente.
Coberturas vegetales	Coberturas y usos del suelo, y parámetros infiltración.
Tipo de suelo	Parámetros infiltración.



Estación pluviométrica La Laguna [2403000117]
Guacamayas, Boyacá
Ideam, 2019
Fotografía de Andrés Reyes

busca representar y su cabida dentro del ciclo hidrológico propuesto. Las coberturas vegetales se toman de estudios previos, como la *Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017) y tipos de suelo generados a partir de los insumos usados en la sección 3.1.2. o mediante reconocimiento en campo.

El procedimiento para la modelación hidrológica presente en el diagrama de flujo de la figura 22 busca indicar de manera resumida los procesos hidrológicos que se quieren simular en cada unidad de modelación. Para esto se proponen cuatro pasos de carácter secuencial:

1. Lluvia. Paso inicial de la modelación, en donde se agrupan la construcción de curvas IDF y de hietogramas de lluvia sintéticos. Estos elementos serán la entrada principal de la modelación.
2. Infiltración. Esta parte contiene el proceso principal que se busca modelar, el cual es la interacción del agua atmosférica proveniente de la precipitación y las coberturas y suelos de cada unidad de modelación. En este punto es posible tener las láminas de infiltración y de precipitación efectiva (uso de la aproximación empírica o física propuesta: número de curva CN, o Green-Ampt).
3. Escorrentía. En este punto, usando la precipitación efectiva proveniente del paso anterior, se calculan las abstracciones generadas en la unidad de modelación. Para el caso en donde las escalas temporales son bajas y la información disponible respecto a captaciones de agua no se tiene en cuenta, se asume que toda la precipitación efectiva se convertirá en escorrentía directa.
4. Hidrograma. Asumiendo que la escorrentía directa calculada será transportada por los drenajes y laderas al punto de concentración, se construye la hidrógrafa de creciente correspondiente a la respuesta de la unidad de modelación después de recibir el hietograma generado. Según exista información disponible, la geometría y tiempo de esta respuesta será generada de forma sintética o modelada.

La alternativa de modelos de infiltración propuestos para el caso en el que los parámetros hidráulicos del suelo son escasos, es la aproximación hecha por el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos (SCS), conocido comúnmente como el *número de curva*, usado en algunos estudios para modelar la infiltración (Chahinian *et al.*, 2005; Sihag *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2011). El método del número de curva SCS-CN constituye una herramienta simple para aplicarse con poco conocimiento de las características de los suelos en una cuenca. Este modelo ha tenido avances y correcciones sobre sus parámetros, principalmente su tasa de abstracción inicial, propuesta por Lim *et al.* (2006) y Shi *et al.* (2009), y ajustes sobre el número de curva teniendo en cuenta el contenido de humedad previo en el suelo, esto presente en el estudio de González *et al.* (2015).

Caso contrario al anterior, para el cual existen parámetros que caractericen el comportamiento hidráulico del suelo, se propone el modelo de infiltración de Green-Ampt, usado ampliamente en la modelación de la infiltración. A diferencia del método SCS-CN, es una representación física simplificada que asume un perfil de suelo homogéneo y una distribución uniforme del contenido inicial de agua. Se considera un frente húmedo presente en el perfil del suelo que separa el perfil en una zona saturada superior y una zona no saturada inferior, en donde la tasa de infiltración tiende a cero a lo largo del tiempo, muy similar al comportamiento que puede captarse con un infiltrómetro, generando resultados muy fiables como los construidos en Giraldo *et al.* (2005).

Respecto a la generación del caudal o de la hidrógrafa de crecientes, se contemplan dos opciones. El primer escenario, el más recurrente, es donde no existen datos de caudal de la cuenca. Por tanto, la posibilidad de generar un hidrograma unitario propio de la cuenca o la calibración de modelos más complejos para la construcción de una hidrógrafa no está presente. Por lo anterior, se propone el uso de los hidrogramas unitarios sintéticos, los cuales pueden ser configurados para las características topográficas

e hidrológicas propias de cada cuenca. En este caso se propone el hidrograma unitario sintético diseñado por el SCS, el cual se construyó recopilando el comportamiento de cuencas susceptibles a crecientes (Chow *et al.*, 1994).

Durante los ejercicios hechos para la validación de esta metodología, se evidenció que los volúmenes generados por las unidades de modelación, al momento de simular condiciones de saturación previa en el suelo, eran más cercanos a los volúmenes reales estimados para los casos piloto que contaban con un evento pasado de avenida torrencial. En otras palabras, se asume que el suelo tiene inicialmente un alto contenido de humedad y fue sometido a un periodo prolongado de lluvias. Esto modificará el comportamiento de la tasa de infiltración aumentando la producción de escorrentía.

Al momento de construir la hidrógrafa de creciente, calculada ya la precipitación efectiva, puede darse el caso en el que exista información de caudales a nivel subdiario, entonces sería viable utilizar métodos de carácter distribuido para la generación del caudal. Ejemplo de esta simulación puede ser una función de retardo acumulativo que simule el tiempo de residencia del agua en la red de drenaje a lo largo del tiempo, similar al ejercicio desarrollado con la herramienta de modelación TOPMODEL presentada por Gil y Tobón (2016). Incluso, el uso del enrutamiento y tránsito de la escorrentía por los drenajes generados dentro las unidades de modelación que, mediante el modelo Multilineal Discreto de Cascada Rezagada (Multilinear Discrete Lag-Cascade -MDLC-) se com-

bina el tránsito en cascadas discretas con un canal lineal caracterizado por un parámetro de retraso advectivo, mostrando resultados muy buenos en el ejercicio desarrollado por Giraldo *et al.* (2005).

4.5. Productos del detonante lluvia

4.5.1. Series de caudal para cada periodo de retorno

El producto principal del modelo propuesto es la hidrógrafa de creciente en unidades de $\left[\frac{m^3}{s}\right]$, generada para cada una de las unidades de modelación identificadas dentro del área de estudio. Una de las principales suposiciones al momento de modelar estas crecientes súbitas de caudal es que estas unidades están en un estado inicial pasivo, en el cual no hay producción de caudal y solo se activan frente a un impulso de precipitación. Por lo anterior, las hidrógrafas generadas inician en $0\left[\frac{m^3}{s}\right]$ y terminan en $0\left[\frac{m^3}{s}\right]$ luego de evacuar toda la precipitación efectiva.

Las hidrógrafas generadas coincidirán con cada escenario propuesto, es decir, los periodos de retorno para los que están construidas las curvas IDF (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500). Estará a criterio de los modeladores definir la duración del evento de precipitación (información de eventos pasados, registro de estaciones subdiarias, imágenes de radar, testimonio hablado, etc.), debido a que el volumen final que será generado por el modelo hidrológico y transportado por el modelo fluidodinámico dependerá enteramente de la masa entregada por la tormenta.



Quebrada en el municipio de Susacón, Boyacá, 2019.
Fotografía de Andrés Reyes

The image is a vertical split. The left side shows a landscape with a prominent, dark, rocky volcanic ash flow or lava field that has advanced down a slope. The right side shows a lush, green, hilly landscape with dense vegetation and scattered trees. In the center, there is a white circle containing the number 5, and below it, the title text is displayed in white.

5

**Caracterización de
la amenaza a escala
1:25 000**



Quebrada Valencia
Santa Marta, Magdalena, 2018
Fotografía de Andrés Reyes

Para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000 se propone simular escenarios para diferentes periodos de retorno. Para cada uno de estos, se evaluará la dinámica de la mezcla del agua de escorrentía y material sólido que se desprenda de las laderas y bancas de los cauces. Los resultados de la evaluación de dichos periodos se integran con la variable granulométrica característica de los depósitos para obtener la categorización de la amenaza con base en las modelaciones del flujo. Los resultados provenientes de las modelaciones se integran con la susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales para obtener la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000.

Si los resultados de la zonificación a escala 1:25 000 indican zonas en amenaza alta o media que involucren zonas urbanas y de expansión urbana ocupadas por depósitos asociados a torrencialidad, se debe evaluar la amenaza a escala 1:2000.

5.1. Estimación de volúmenes de sólidos 1:25 000

La estimación de volúmenes de sólidos que se involucran en una avenida torrencial contempla una serie de factores causales de origen geológico, geomorfológico, climatológico, tectónico, hidrológico, y antrópico; los cuales, con su acción individual o combinada, pueden conducir a procesos de inestabilidad. El factor de aporte más relevante para la generación de flujos de detritos, flujos de lodos o flujos hiperconcentrados, proviene de los movimientos de masa (Johnson y Rodine, 1984). Adicional a esto, (Takahashi, 2014) identifica que los factores que condicionan el aporte de materiales asociados a una ave-

nida torrencial se pueden separar en las siguientes clases: (i) depósitos de materiales granulares y finos ubicados en el fondo y a los costados de un canal que inducen erosión por el movimiento y se mezclan con el flujo de agua; (ii) materiales granulares y finos deslizados que se transforman en un flujo por la interacción del agua almacenada en el conjunto de materiales a medida que se desplazan ladera abajo; y (iii) rotura de una represa natural generada por el depósito de un deslizamiento previo que se removiliza al alcanzar una condición crítica de erosión.

En esta sección se abordan los modelos propuestos para la estimación del aporte de volumen de sólidos a un flujo resultante de la erosión de laderas por acción de la lluvia, deslizamientos, caídas de rocas y flujos. Estos procesos son productos del proceso de iniciación del esquema metodológico. Para cada una de las metodologías de aporte de sólidos se identificarán variables e insumos requeridos para su desarrollo. Estas variables o insumos pueden consultarse en los productos de la caracterización de avenidas torrenciales y detonantes desarrollados en los capítulos 3 y 4, y de la *Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017).

5.1.1. Fuentes de información e insumos para el cálculo del volumen de sólidos que se incorpora al flujo

La metodología de aporte de sólidos por erosión en laderas, deslizamientos, caídas de rocas y flujos, requiere como insumo los productos de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, las geoformas indicativas y temporalidad relativa de los depósitos, los rasgos geomorfológicos de avenidas torrenciales históricas en

la zona de estudio, los puntos de interés geomorfológicos a lo largo del cauce, y la caracterización de los depósitos. Esta sección aborda el procesamiento de la información de entrada con el fin de estimar los volúmenes de aporte de material por avenidas torrenciales.

5.1.1.1. Productos de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000*, utilizados para la estimación de sólidos

La iniciación de las avenidas torrenciales parte de la definición de las zonas susceptibles a procesos de movimientos en masa. Para identificar las zonas susceptibles por movimientos en masa de tipo deslizamiento, tipo caída, y tipo flujo se siguen los lineamientos planteados en la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez et al., 2017). El mapa de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa es necesario para la definición de las zonas de aporte de sólidos. Adicionalmente, los productos intermedios como los mapas de unidades geológicas superficiales, subunidades geomorfológicas, inventario de movimientos en masa o de procesos morfodinámicos y cobertura de la tierra forman parte de los insumos generados que aportan al desarrollo de la caracterización de avenidas torrenciales. Las categorías de amenaza alta y media por movimientos en masa representan finalmente un insumo importante para la cuantificación del volumen de material de aporte a una avenida torrencial (p. ej., flujo de detritos, flujo de lodos o flujo hiperconcentrado).

5.1.1.2. Productos de la caracterización de avenidas torrenciales utilizados para la estimación de sólidos

Para la estimación de los volúmenes de aporte de sólidos es necesario considerar las geofomas indicativas y la temporalidad relativa de los depósitos de eventos previos de avenidas torrenciales. Esta temporalidad se determina en la fase previa de la caracterización de avenidas torrenciales (capítulo 3). Con base en la descripción de la temporalidad relativa de los depósitos, se define un nivel de susceptibilidad geomorfológica

a avenidas torrenciales para cada evento identificado o validado en campo (p. ej., alta, media y baja). La caracterización de estos depósitos es un complemento a la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa de tipo flujo y mencionada en la sección 5.1.2.2.1.

5.1.1.3. Productos de los detonantes utilizados para la estimación de sólidos

En esta guía metodológica, la lluvia se considera como el principal agente detonante que influye en el aporte de sólidos a las avenidas torrenciales. Desde la metodología de cuantificación de sólidos de aporte por deslizamiento, caídas de rocas y flujos, se obtiene un volumen de material que es potencialmente movilizable. Este volumen se incorpora a la corriente o red de drenaje principal. Para la estimación de dicho volumen, a partir de un modelo espacial de estabilidad de taludes, se deben evaluar diferentes escenarios de lluvia y resolver el proceso de infiltración, teniendo en cuenta el comportamiento mecánico de los materiales (capítulo 4).

Otro de los productos requeridos del capítulo 4 son las series de caudal para cada periodo de retorno, empleados en la estimación del volumen de material de aporte por deslizamientos, caída de rocas y flujos. Estos volúmenes son o de la información de los materiales levantada en campo (el método es gradientes o campo), resultando en un caudal sólido que será suministrado al modelo fluidodinámico.

Finalmente, las curvas IDF descritas en la sección 4.4.2. son requeridas para la definición de los factores de ajuste aplicados al volumen de sólidos; así es posible establecer la proporción de material de aporte proveniente de la metodología de cuantificación de volumen por deslizamientos, caída de rocas y flujos, y evaluados para los diferentes escenarios propuestos de periodos de retorno.

5.1.2. Procedimiento para la estimación de sólidos

En esta sección se presentan las generalidades y requisitos para la aplicación de los modelos propuestos para la estimación del aporte de sólidos a un flujo resultante de la erosión en laderas, deslizamientos y caídas de rocas. Adicionalmen-

te, las suposiciones y limitaciones de las metodologías son abordadas con el fin de brindar un panorama de los productos resultantes de esta actividad.

5.1.2.1. Sólidos provenientes de erosión de laderas

La erosión puede definirse como un proceso de desprendimiento, remoción y transporte de partículas de suelo o material rocoso por medio del agua, viento y gravedad. En un sentido hidrológico y geomorfológico, el proceso erosivo se analiza habitualmente en una unidad concreta, como una ladera o una cuenca.

Existen varios tipos de erosión (Webster, 2005), sin embargo, se consideran que las más recurrentes en cuencas susceptibles a procesos de avenida torrencial son la hídrica, causada por la escorrentía superficial al generar surcos y cárcavas en el suelo, o la erosión pluvial, la cual ocurre debido al efecto de las fuerzas de la lluvia sobre el suelo. Estos tipos de erosión pueden ser significativos y evidentes en zonas que tienen muy poca cobertura vegetal, pendientes muy altas y bajo contenido de materia orgánica.

Haan *et al.* (1994) definen la erosión pluvial como el desprendimiento de suelo debido a la energía que genera la caída de la lluvia; para que se produzca erosión, las partículas sueltas deben ser transportadas desde el sitio de desprendimiento. Dicho transporte de partículas de suelo desprendido por salpicadura se produce debido a las gotas de lluvia, así como por el flujo superficial. La cantidad del suelo desprendido está dada como la energía y el momento que ocasionan las gotas de agua al chocar en la superficie. El

anterior tipo de erosión es tomado por muchos autores como el más recurrente y generalizado, por ende, este proceso es el que se propone para ser modelado.

Para simular el efecto del impacto por lluvia se propone el modelo usado por Gabet y Dunne (2003), el cual se compone de principios físicos y empíricos que provienen de diferentes iteraciones para mejorar el modelo construido inicialmente por Palmer (1965). Los principios usados en este modelo son:

- » Físico. Energía cinética generada por una gota de determinado tamaño al impactar suelo desnudo causa erosión.
- » Empírico. La energía del daño se disipa a una tasa exponencial según sea la fracción de la cobertura.
- » Empírico. La energía del daño se disipa a una tasa exponencial según sea la profundidad de la lámina en superficie.
- » Empírico. La tasa de degradación del suelo en términos de masa por unidad de tiempo decaerá a una tasa determinada según sea la cohesividad de este.

En la tabla 12 se presentan los insumos iniciales del proceso lluvia/erosión/transporte de sedimentos (infiltración/degradación/transporte). Inicialmente se busca definir los insumos, su razón y función dentro de la modelación sugerida. Además de los insumos necesarios, se presenta la función, lo cual está ligado al proceso natural que se busca representar dentro del ciclo hidrológico propuesto. La generación de unidades de modelación está descrita en la

» **Tabla 12.** Función y razón de insumos propuestos para modelación hidrológica para la producción de sedimentos

Insumos modelación erosión en laderas	
Insumo	Función dentro de modelación
Área de estudio, unidades de modelación	Dominio de modelación.
	Puntos de acople fluidodinámica.
Modelo digital de terreno (MDT)	Parámetros topográficos (pendientes, función de ancho, índice topográfico).
Hietogramas de diseño	Escenarios de modelación.
	Detonante de erosión por impacto (en unidades de intensidad).
Coberturas vegetales	Coberturas de la tierra y parámetros infiltración.
	Coberturas uso de suelo y cobertura vegetal (disipación de la erosión).
Tipo de suelo	Clasificación a nivel textural (parámetros infiltración).

sección 4.1., la selección y construcción del modelo MDT adecuado en la sección 2.6., la construcción de hietogramas en la sección 4.4.3.

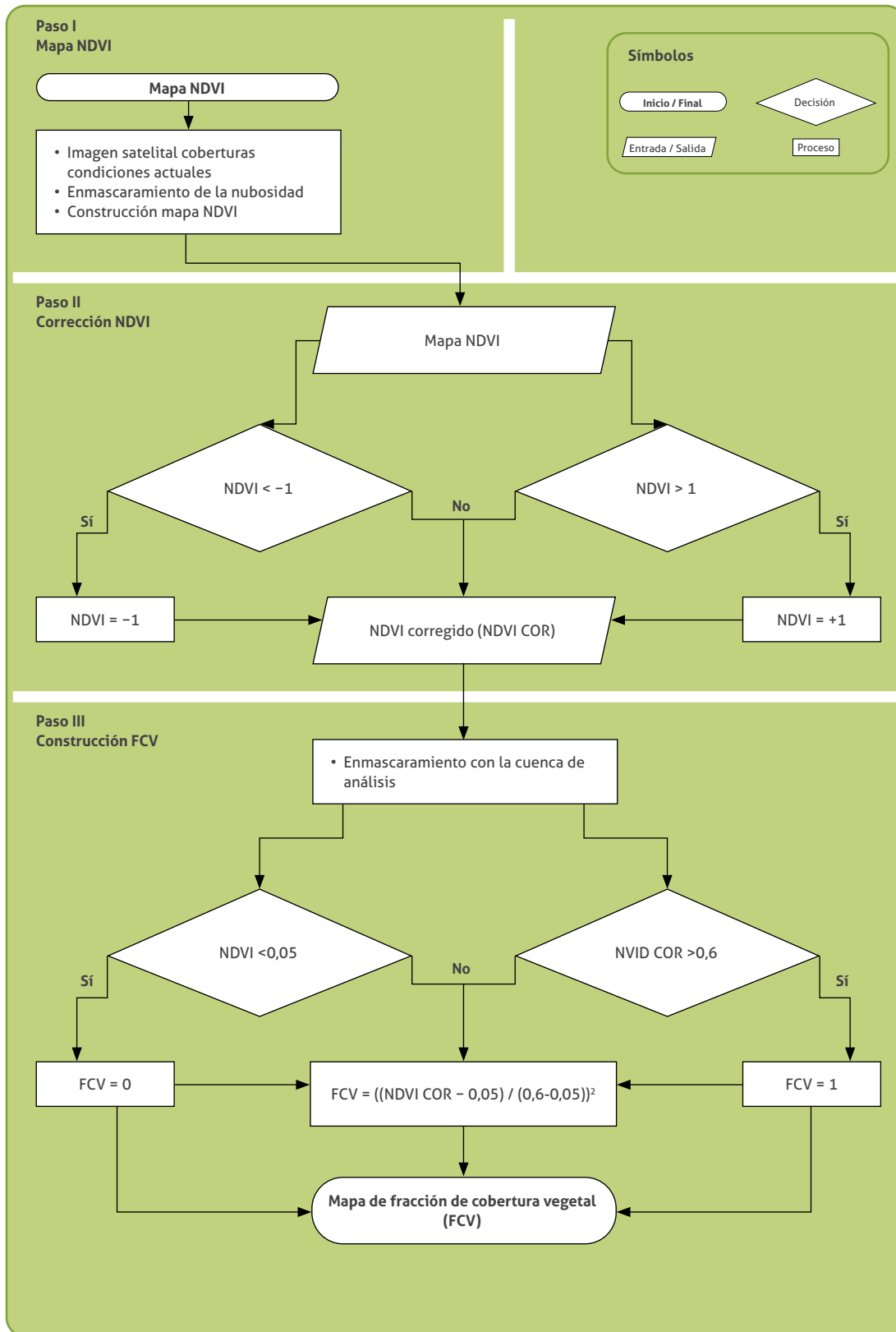
La infiltración proviene de la modelación hidrológica presentada en la sección 4.4.4., en donde uno de sus productos es la variación de la tasa de infiltración, expresada en términos de precipitación efectiva o escorrentía.

Por último, las coberturas vegetales son representadas en este modelo mediante la construcción del índice de fracción de cobertura vegetal, que proviene de un proceso hecho sobre un mapa de índice de vegetación de diferencia normalizada (*normalized difference vegetation*

index —NDVI—). El proceso sugerido para la construcción de la fracción de cobertura vegetal está en la figura 23. Los insumos base para este proceso son la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda del rojo (RED) del sensor utilizado (p. ej., para el sensor Landsat 7 ETM+ la banda 4 es la NIR, y la banda 3 es la RED; para el sensor Landsat 8 la banda 5 es NIR, mientras la banda 4 es RED), basándose en las propuestas de fuentes hechas en el capítulo de “Coberturas y usos de suelo”, presentes en la *Guía metodológica de movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017) y apoyándose en un reconocimiento en campo exhaustivo.



Avenida torrencial de 2017
Quebrada San Antonio
Mecoa, Putumayo
Fotografía de Michael Rangel



» **Figura 23.** Esquema para construcción del mapa de fracción de cobertura vegetal (FCV) partiendo de la corrección del NDVI

El procedimiento para la modelación hidrológica de la producción de sedimentos en suspensión se muestra en el diagrama de flujo de la figura 24, que busca indicar de manera resumida los procesos hidrológicos que se quieren simular en el interior de cada unidad de modelación. Para esto se proponen cuatro pasos de carácter secuencial:

1. Lluvia. Paso inicial de la modelación en donde se agrupan la construcción de curvas IDF y de hietogramas de lluvia sintéticos. Estos serán la entrada principal de la modelación y base para calcular el diámetro de gota más probable (D_{50}) dada una intensidad.
2. Infiltración. Esta parte contiene el proceso principal que se busca modelar, el cual es la interacción del agua atmosférica proveniente de la precipitación y las coberturas y suelos de cada unidad de modelación. En este punto es posible tener las láminas de infiltración y de precipitación efectiva (uso de la aproximación empírica o física propuesta, *número de curva*, CN, o Green-Ampt). Con la lámina de precipitación efectiva se calcula la profundidad de flujo superficial en laderas con la aproximación sugerida por (Chow *et al.*, 1994).
3. Erosión por impacto. En este punto se usa el modelo *rain power* (Gabet y Dunne, 2003), recibiendo como entrada los diámetros de gotas calculados en el paso I (*lluvia*), el mapa de fracción de cobertura vegetal y la profundidad de flujo en laderas, generada en el paso *infiltración*. El producto de este paso es la tasa de producción de sedimentos en suspensión.
4. Sedimentograma. Una vez modelada la producción de sedimentos en suspensión, se propone una aproximación distribuida para el transporte de estos al punto de concentración con uso del hidrograma de caudal líquido generado en la modelación hidrológica.

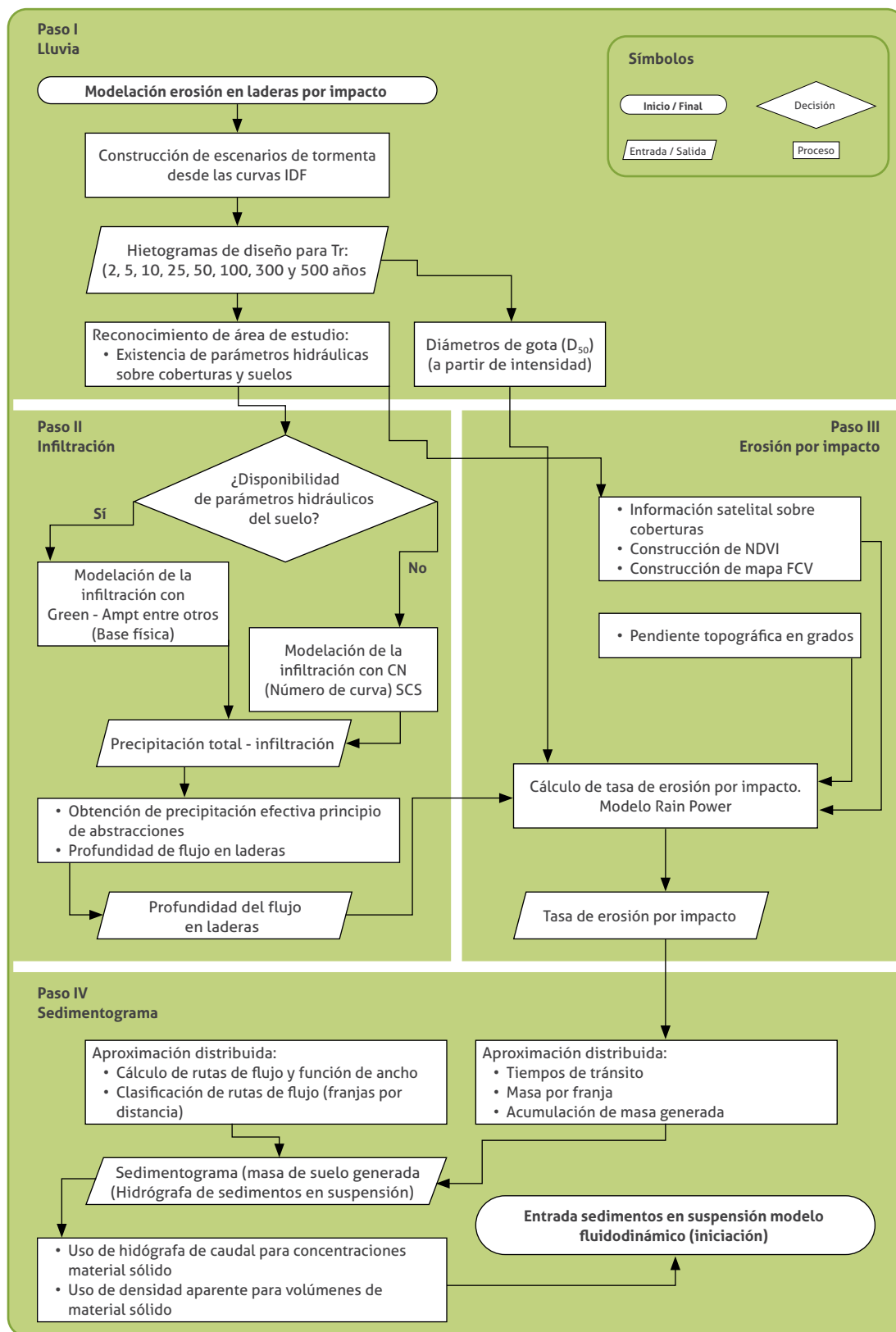
Siendo más específicos sobre el paso I presentado en la figura 24, se propone un análisis análogo a la curva granulométrica que, para efectos de erosión por lluvia, se recomienda el D_{50} (tamaño medio de la muestra). Esta se calcula de manera indirecta con aproximaciones empíricas que han evolucionado con el tiempo,

como las construidas para diferentes latitudes en Palmer (1965) y, específicamente, para los trópicos en Yakubu *et al.* (2016). La profundidad del flujo en laderas o producción de precipitación efectiva (encargada de transportar el sedimento) se explica en la sección 4.4.4., según el modelo hidrológico.

Para la construcción del sedimentograma, se propone una aproximación con métodos de carácter semidistribuido. Por tanto, una función de retardo acumulativo sirve para representar el tiempo de residencia del sedimento en suspensión dentro de la red de drenaje o en el interior de un mapa de distancias clasificadas. Posteriormente debe acoplarse con la hidrógrafa generada en ese mismo momento, que también usa la lluvia como detonante y permite generar productos en términos de concentración y volumen. Una herramienta de modelación hidrológica que emplea la función de retardo acumulativo es TOPMODEL (Gil y Tobón, 2016). Otra aproximación es la de flujo superficial poco profundo propuesta por Goodrich *et al.* (2012) que presenta limitaciones en sus parámetros por su origen empírico respecto a la función de retardo acumulativo dado su origen conceptual. Sin embargo, no se descarta puesto que puede llegar a ser útil en un escenario de escasez de datos.

La relación entre el modelo hidrológico (sección 4.4.4.) y el modelo propuesto para la producción de sedimentos por erosión en laderas es fundamental. Dadas las conclusiones de Monsalve (2009), el desarrollo base de la erosión pluvial se rige por las principales variables hidrológicas (precipitación, interceptación y escorrentía) al momento de simular la producción y el transporte de sólidos en suspensión generados por una tormenta. Los productos de la modelación hidrológica de los detonantes (precipitación y caudal líquido) son variables de entrada para la modelación de la erosión, heredando las mismas ventajas y limitaciones que el modelo hidrológico.

Una limitación adicional de los modelos de erosión dentro del contexto nacional es la dificultad para calibrar y validar los resultados debido a la falta de mediciones en una forma lógica, sistemática e instrumental de la producción de sedimentos en suspensión por una erosión diferente a la fluvial (Navas, 1991).



» **Figura 24.** Procedimiento para la modelación hidrológica propuesto para la producción de sedimentos a nivel de unidades de modelación

5.1.2.2. Sólidos provenientes de deslizamientos, caídas de rocas y flujos

La metodología para la cuantificación de los volúmenes de aporte de sólidos contempla el potencial volumen movilizable proveniente de movimientos en masa como deslizamientos, caída de rocas y flujos. Estos procesos constituyen uno de los principales factores de suministro para la generación de avenidas torrenciales (Johnson y Rodine, 1984).

La metodología de cuantificación del volumen de sólidos aportado por deslizamientos, caídas de rocas y flujos contempla diferentes niveles de procesos que, dependiendo de la información disponible de la zona de estudio, permite escoger entre un procedimiento u otro (figura 25). La opción 1: si se cuenta con información de propiedades geotécnicas y espesores de los geomateriales (p. ej., parámetros ingenieriles de las UGS), se opta por modelos espaciales de estabilidad de laderas que resuelven el proceso de infiltración bajo diferentes escenarios de lluvia y calculan el factor de seguridad para un mecanismo de talud infinito en cada celda del dominio de análisis. Sin embargo, cuando en la zona de estudio no se tiene información de las propiedades geotécnicas de los materiales, la estimación de volúmenes de sólidos se calcula con la opción 2, donde se define como el mayor volumen obtenido a partir de la comparación de dos procedimientos: (i) contribuciones de volúmenes de campo (V_c) por unidad de modelación, o empleando métodos heurísticos; y (ii) contribuciones de volúmenes adyacentes al cauce por unidad de modelación, empleando relaciones de gradientes (V_g). A continuación, se explicará con mayor detalle cada una de las opciones planteadas en la figura 25.

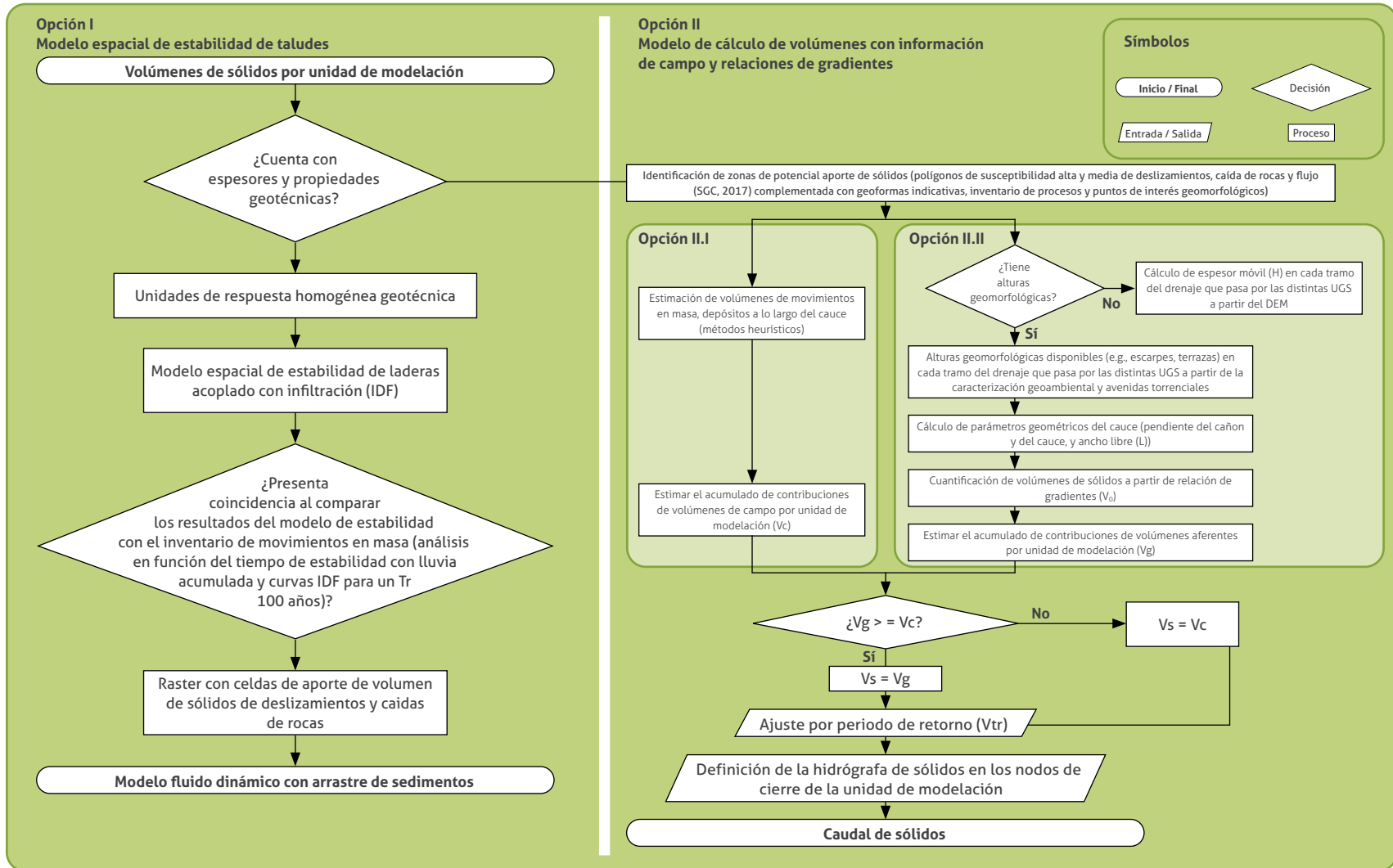
5.1.2.2.1. Contribuciones de volúmenes de sólidos por unidad de modelación empleando modelos espaciales de estabilidad de taludes (opción 1)

La estimación del volumen de sólidos provenientes de movimientos en masa, especialmente deslizamientos y caídas de rocas que involucran mecanismos de falla considerando el comportamiento hidromecánico de los materiales (figura 25, opción 1), se basa en modelos espaciales de análisis de estabilidad de laderas que consi-

deran la influencia de la estructura geológica, pendiente y morfología del talud, propiedades físicas y mecánicas de los materiales de la zona, y variaciones del nivel freático en la activación de un deslizamiento (Yoshimatsu y Abe, 2006). Asimismo, estos modelos asocian diversos factores detonantes del proceso de remoción en masa como eventos de lluvia prolongada e intensa (Revellino *et al.*, 2008; Yoshimatsu y Abe, 2006) y flujos de escorrentía (Takahashi, 2014).

Los modelos espaciales de estabilidad de laderas se basan en la solución del estado de equilibrio en cada celda del dominio sometido a infiltración unidimensional de la lluvia, lo que permite la variación del factor de seguridad del talud en el tiempo donde se incorporan diferentes criterios de falla del material. Por ejemplo, Casagli *et al.* (2005) recomiendan el uso del criterio de Mohr-Coulomb para el cálculo de presiones de poros positivas y el criterio de Fredlund para el cálculo de presiones de poros negativas. La infiltración de la lluvia se modela a partir de las soluciones analíticas o numéricas para ecuaciones diferenciales (p. ej., ecuación de Richards) que representan el flujo vertical unidimensional en materiales isotrópicos y homogéneos para condiciones saturadas y no saturadas (UNGRD y PUJ, 2018).

Para la aplicación de los modelos espaciales de estabilidad de taludes se requiere establecer zonas o unidades de respuesta homogénea geotécnica, mediante las cuales se agrupan zonas de similar origen geológico, espesor de suelo, geomorfología, cobertura vegetal, pendiente promedio, tipo de suelo y parámetros de resistencia. A partir de la definición de dichas zonas con propiedades mecánicas y de flujo necesarias para el análisis de estabilidad, se definen diferentes escenarios de lluvia acumulada para los periodos de retorno propuestos (sección 4.4.1.). Con esta información se evalúa la infiltración con distintas condiciones de nivel freático en las unidades homogéneas, y la evolución temporal del factor de seguridad en cada celda del MDT. Ejercicios de análisis espaciales de estabilidad de laderas adelantados en Colombia permitieron simular los aportes de sólidos para el evento del 31 de marzo de 2017 en la cuenca de Mocoa, Putumayo. El detalle de este ejercicio se puede encontrar



» Figura 25. Procedimiento para la estimación de volúmenes de sólidos por deslizamientos, caídas de rocas y flujos

en el reporte “Definición de sectores críticos y sitios de implementación de nuevos monitoreos” de la “Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, en el marco de las declaratorias de calamidad pública y desastre del Municipio de Mocoa - Putumayo, debidas al evento presentado el 31 de marzo de 2017” (UNGRD y PUJ, 2018).

Entre las formas más comunes de analizar la estabilidad de taludes están los métodos de equilibrio límite y de análisis límite. En general, estos se basan en las leyes físicas y mecánicas universales de conservación de masa, energía y equilibrio de fuerzas Irigaray y Chacón (2002). En la evaluación de la estabilidad de los taludes, se emplean valores de factores de seguridad para determinar la proximidad de la ocurrencia de la falla. Cuando el valor de esta relación es superior a 1, las fuerzas o momentos resistentes al corte son mayores que las fuerzas o momentos actuantes, y el talud se considera estable; mientras que, si el valor es igual o inferior a 1, se considera que el talud es inestable y se asocia a un escenario de falla (Rouaiguia y Dahim, 2013).

El análisis de estabilidad de laderas se realiza en cada celda del MDT, para así determinar el factor de seguridad correspondiente a los escenarios de lluvia y modelos de infiltración y escurrimiento propuestos (sección 4.4.1.). Para los diferentes periodos de retorno es posible identificar el número de celdas con factores de seguridad igual o inferior a 1, y la profundidad a la cual se generan dichos factores de seguridad mínimos. De contarse con información hidrometeorológica de calidad, el análisis de la serie de lluvias puede incorporar eventos acumulados de varios días de duración, representativos de las series de lluvias acumuladas que detonan procesos de movimientos de masa en la zona de estudio y ajustados para diferentes periodos de retorno.

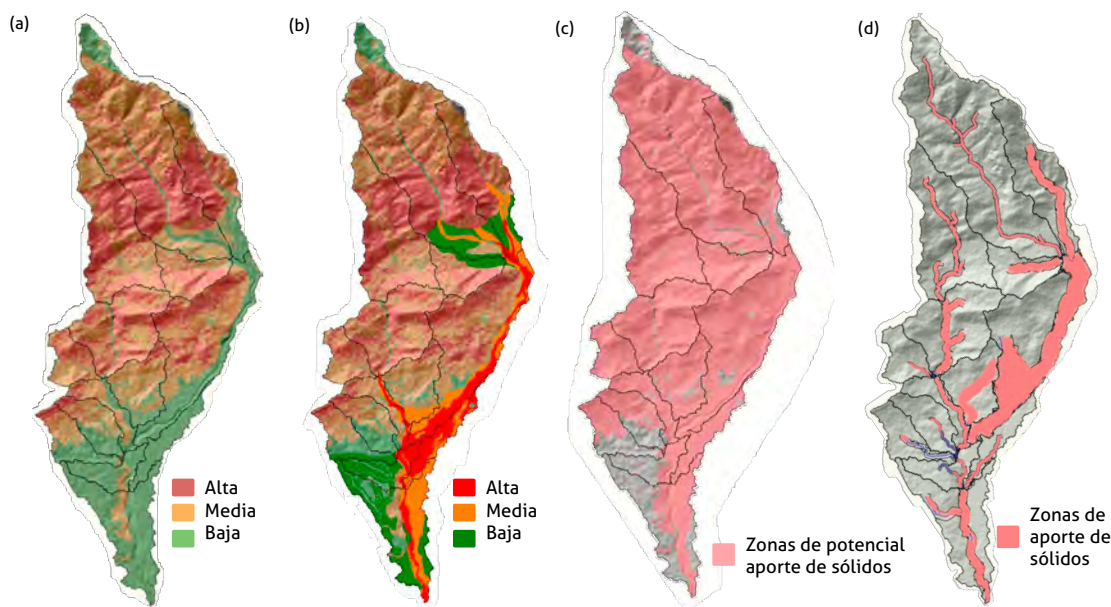
Los resultados del análisis de estabilidad de laderas deben compararse con el inventario de movimientos en masa proveniente de la caracterización geoambiental, o el complementado en la etapa de caracterización de avenidas torrenciales

(capítulo 3). Esta última incluye el análisis multitemporal que permite identificar los periodos de activación y movilidad de los procesos morfodinámicos previos. Teniendo en cuenta que los inventarios de movimientos en masa pueden estar limitados a no más de 100 años de información confiable, los resultados del modelo de estabilidad de laderas deben compararse con los resultados equivalentes a curvas IDF de un periodo de retorno de 100 años unido a la lluvia antecedente o acumulada. En caso de no presentar coincidencia entre el inventario de movimientos en masa y los resultados del modelo espacial de estabilidad de laderas, se procede a ajustar la definición de las unidades de respuesta homogénea geotécnica o los parámetros de modelación (p. ej., parámetros geotécnicos y condiciones iniciales).

El resultado final del procedimiento de estimación del volumen de sólidos provenientes de movimientos en masa es un *raster* en donde se dispone en cada celda del valor del factor de seguridad, así como la profundidad en la que se obtuvo su valor mínimo. El volumen de sólidos asociado a una serie de precipitación en un periodo de retorno determinado se obtiene al multiplicar el área en cada celda por la profundidad movilizada de cada celda en donde el cálculo reporta el factor de seguridad menor o igual a la unidad. Los valores de volúmenes calculados para las celdas con factores de seguridad menores o iguales a 1 se suman en la totalidad del área de análisis. Este *raster* con puntos inestables se entrega al modelo fluidodinámico con capacidad de transporte de sólidos, para ser transitado hasta el cauce principal y ser incorporado como un volumen adicional en el flujo. Si no se cuenta con un modelo fluidodinámico con capacidad de transporte de sedimentos, los volúmenes pueden acumularse en el punto de cierre de las unidades de modelación y realizar su transporte a partir de este punto.

5.1.2.2.2. Contribuciones de volúmenes de sólidos por unidad de modelación empleando relaciones de gradientes e información de campo (opción 2)

Para el caso en el que no se cuente con información geotécnica en cada una de las UGS y espesores de los materiales del área de estudio, se puede optar por el procedimiento descrito en la



» **Figura 26.** Esquema de pasos para la definición de zonas de aporte de sólidos

a) zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa; b) zonificación complementada de susceptibilidad por movimientos en masa; c) zonas con potencial de aporte de sólidos, y d) zonas de aporte de sólidos.

figura 25, opción 2. Inicialmente, se definen las zonas de potencial aporte de sólidos, partiendo de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en categorías alta, media y baja (Rodríguez *et al.*, 2017) y como se muestra en la figura 26a. En la figura 26b se presentan las zonas clasificadas en categorías alta, media y baja por movimientos en masa de tipo deslizamiento, tipo caída y tipo flujo, integrada con el complemento de la susceptibilidad geomorfológica por tipo flujo de acuerdo con la temporalidad relativa e indicativo del aporte por cercanía al cauce. La unión de las zonas que tienen asignada una susceptibilidad alta y media en la guía metodológica por movimientos en masa, y una categorización alta y media de la figura 26a, y la categorización alta y media de la susceptibilidad geomorfológica de la figura 26b, se denominan *zonas con potencial aporte de sólidos* (figura 26c).

A partir de la definición de las zonas con potencial aporte de sólidos, se estima el volumen de material proveniente de dos diferentes procedimientos: la opción 2.1 correspondiente a las contribuciones de volúmenes de campo por unidad de modelación, o empleando métodos heurísti-

cos y la opción 2.2 correspondiente a las contribuciones de volúmenes adyacentes al cauce por unidad de modelación, empleando las relaciones de gradientes que se explicarán posteriormente.

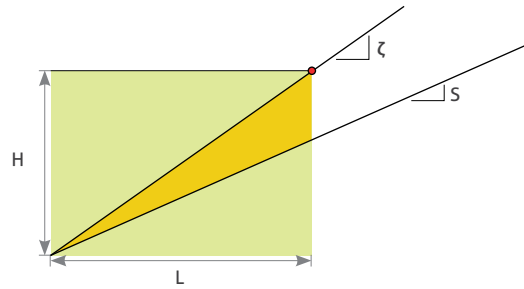
La opción 2.1 consiste en la estimación del volumen de movimientos en masa y depósitos a lo largo de la zona de tránsito, identificados de la caracterización geoambiental y en la etapa de caracterización de avenidas torrenciales. Los modelos heurísticos están basados en el conocimiento experto, donde se proponen relaciones empíricas o el uso de aproximaciones a partir de escasa información. Una vez estimado el volumen de la opción 2.1 que resulta del mapeo directo de los materiales en la zona de tránsito del drenaje y del aporte directo al cauce proveniente de los movimientos en masa, se realiza el acumulado de dichas contribuciones por unidad de modelación (V_c).

La opción 2.2 contempla la estimación de los volúmenes de sólidos por deslizamientos, caída de rocas y flujos a partir de relaciones de gradientes que toman elementos morfométricos y condiciones geológicas del área de estudio (V_g). Este procedimiento se debe realizar basado en secciones transversales con una separación de

al menos 200 m, o según el criterio del profesional tomando valores promedios de estos factores según las unidades geológicas superficiales cartografiadas con las que se intercepten. El método está formulado en función de un factor geométrico, un factor geológico y el espesor del material a movilizar. El factor geométrico considera las pendientes transversales de las paredes del cauce (ζ) y la pendiente longitudinal del cauce principal (S). Esta opción supone que el área entre las pendientes S y ζ describe la potencial movilización de un material que transita hacia una pendiente más estable y descrita por S . La finalidad de este factor es estimar la proporción de aporte de sólidos a partir de la relación de áreas formadas entre la proyección de las pendientes y del espesor móvil (H) definida como el promedio de las alturas geomorfológicas (e.g., escarpes, terrazas) identificadas en cada uno de los tramos del drenaje que pasan por las distintas UGS (figura 27). Adicionalmente, la metodología contempla un factor geológico (I_G) que corresponde a una calificación relacionada con la litología y el estado de meteorización de la zona de estudio, se establece a partir de los valores de GSI definidos en las UGS de las unidades de modelación que provienen de la caracterización geoambiental siendo esta una adaptación al ambiente geológico colombiano del estudio de D'Agostino (1996). Finalmente, un factor de movilidad supone que solo una cuarta parte (25%) del material estimado resultará en un aporte efectivo a la fuente hídrica principal. Estos factores se relacionan en la ecuación (14), para el caso en que la pendiente ζ sea mayor que S , y viceversa.

En la figura 27 se presenta la proyección de la pendiente de la pared del cauce (ζ) y la pendiente del cauce principal (S). H corresponde al espesor móvil de cada UGS y L al ancho libre. Las pendientes de las paredes del cauce (ζ) se obtienen a partir de la relación de la diferencia de alturas (Δy) entre el punto alto de la margen o pared de la banca y el punto del cauce actual, y la distancia horizontal medida desde el cauce actual hasta el punto alto de la banca (Δx). El valor de (ζ) a usar es el que presenta mayor inclinación de la banca o margen del drenaje.

La pendiente longitudinal del cauce (S) para cada tramo del drenaje se obtiene a partir de la



» **Figura 27.** Esquema de sección transversal de un cauce teórico

relación entre la diferencia de alturas del punto alto y bajo del cauce actual (Δy) y la distancia horizontal medida desde el punto alto del cauce entre secciones (Δx). Finalmente, en cada uno de los tramos del drenaje definidos para las unidades de modelación se determina un promedio de las pendientes transversales de las paredes del cauce (ζ) y una pendiente longitudinal medida desde el punto más alto del cauce hasta el punto más bajo del cauce entre cada segmento (S), los cuales serán empleados para la estimación del ancho libre proyectado a ambos costados del drenaje.

El volumen de aporte de sólidos por deslizamientos, caída de rocas y flujos V_g se calcula como:

$$V_g = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{8} V_0 I_G \left(1 - \frac{S}{\zeta} \right) \right)_i & \text{si } \zeta > S \\ \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{8} V_0 I_G \left(1 - \frac{\zeta}{S} \right) \right)_i & \text{si } \zeta < S \end{cases} \quad (14)$$

Donde, V_g es la sumatoria de los volúmenes de sólidos de aporte desde $i = 1$ hasta n número de UGS para cada unidad de modelación, y V_0 es el volumen disponible inicial calculado como $V_{0,j} = H_j L_j \Delta x_j$, donde Δx_j corresponde a la longitud de la sección de análisis j a lo largo del cauce.

A continuación, se describe cada factor de la metodología de relación de gradientes para la estimación del volumen de sólidos.

» Volumen disponible inicial: V_0

La definición de las zonas de aporte de sólidos necesarias para la estimación del volumen dis-

ponible inicial V_0 se obtiene a partir de la proyección de una banda en la red de drenaje de la zona de estudio. Esta banda contempla exclusivamente las zonas con potencial aporte de sólidos presentadas en la figura 26d.

El ancho libre (L) a los costados de la red de drenaje se calcula como la proyección de la pendiente de la pared del cauce (ζ) y de la pendiente longitudinal del cauce (S) hasta una altura (H) para cada una de las UGS a lo largo de la zona de tránsito como se muestra en la ecuación (15).

$$L = \begin{cases} \frac{H}{\zeta} & \text{si } \zeta > S \\ \frac{H}{S} & \text{si } \zeta < S \end{cases} \quad (15)$$

Donde L es el ancho libre, H es la altura definida como el espesor móvil en cada UGS, y ζ y S son las pendientes de las paredes del cauce y del cauce actual, respectivamente.

Para la definición de los espesores móviles (H) en cada una de las UGS, se plantean dos alternativas en función de la información disponible. Si se cuenta con información de espesores de las UGS y alturas geomorfológicas a partir de la caracterización geoambiental y de avenidas torrenciales, dichas alturas serán tomadas como H . En caso de no contar con información de alturas en campo, se calcula el espesor móvil de cada UGS teniendo en cuenta secciones transversales en el MDT a lo largo del cauce principal. Si no se pueden identificar las alturas geomorfológicas en el MDT para cada UGS, se establecen secciones transversales, cada 200 m a lo largo del drenaje, y se define un H promedio por cada UGS dentro de la unidad de modelación y es equivalente a la altura del material sólido en las márgenes del cauce.

El ancho libre (L) se extiende a ambos lados del tramo de análisis del cauce, formando una banda o zona aferente. La intersección entre el ancho libre y los polígonos con potencial aporte de sólidos (figura 26c) corresponde al área (A) necesaria para el cálculo del volumen disponible (V_0) de la ecuación (16).

$$V_0 = A \times H \quad (16)$$

» **Tabla 13.** Índice geológico (I_G) de materiales rocosos

Calidad del macizo	GSI	I_G
Muy mala	0-20	5/6
Mala	20-40	4/6
Regular	40-60	3/6
Buena	60-80	2/6
Muy Buena	80-100	1/6

» **Tabla 14.** Índice geológico (I_G) en suelos

Depósitos y suelos	I_G
Suelo transportado	1
Suelo residual	

» Factor geológico

El factor geológico I_G , se basa en el tipo de material (roca o suelo) de las UGS identificadas en la etapa de caracterización de avenidas torrenciales. En las tablas 13 y 14 se presenta la estimación del parámetro I_G con una valoración entre 1/6 a 1 para niveles de alta a baja resistencia a la erosión, según el tipo de material geológico (suelo o roca).

Para la definición del factor geológico en unidades de roca se requiere el valor de GSI en cada una de las UGS. Este factor relaciona el estado del macizo rocoso (tablas 13 y 14), permitiendo la asignación del índice geológico I_G para ser utilizado en el cálculo de volúmenes de sólidos en la ecuación (14).

La ecuación (14) supone, a partir de ejercicios de ajuste con información de volúmenes de sólidos recopilados en el inventario de avenidas torrenciales en Colombia, que solo una cuarta parte del área A (25 %) se movilizaría en el evento de análisis. Como resultado de estas suposiciones, la ecuación (14) presenta un método para obtener el orden de magnitud de los volúmenes a movilizar en la cuenca de estudio.

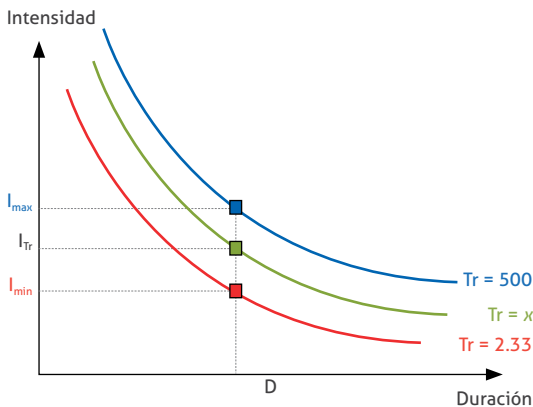
El volumen total de aporte de sólidos final por deslizamientos, caídas de rocas y flujos (V_s), definido como el mayor valor a partir de la comparación individual para cada unidad de modelación entre el volumen de sólidos medidos en campo o mediante métodos heurísticos de la opción 2.1 (V_c) y el volumen de sólidos por el método de relaciones de gradientes de la

opción 2.2 (V_g). El V_s se debe corregir por un factor (F_{sol}) que relaciona la proporción de material cuantificado involucrado en cada escenario de períodos de retorno propuestos de la sección 4.4.1. A partir de las curvas IDF descritas en la sección 4.4.2. se toman los valores de intensidad para una duración de tormenta de diseño, por cada periodo de retorno (figura 28), y se determinan los factores de corrección aplicados al volumen de sólidos siguiendo la ecuación (17).

$$F_{sol} = \frac{I_{Tr} - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (17)$$

Donde F_{sol} es el factor de corrección aplicado al estimativo del volumen de sólidos para un periodo de retorno Tr y para una duración definida de lluvia; I_{Tr} es la intensidad que corresponde al periodo de retorno que se esté evaluando para la duración definida de la lluvia de diseño; I_{min} es la intensidad obtenida para el periodo de retorno más pequeño para la duración definida de la lluvia de diseño (p. ej., 2,33 años); e I_{max} es la intensidad obtenida para el periodo de retorno mayor para la duración definida de la lluvia de diseño (p. ej., 500 años).

Finalmente, se obtienen los volúmenes de sólidos de aporte en cada unidad de modelación para cada periodo de retorno propuesto. Dichos volúmenes se desagregan siguiendo la distribución del hidrograma de caudal líquido para cada escenario y se entregan en los puntos de cierre de las unidades de modelación, lo cual resulta en el



» **Figura 28.** Valores de intensidad para una determinada duración de lluvia a partir de curvas IDF

insumo principal para la simulación fluidodinámica en las secciones 5.2. y 6.2., y como se detallará en la sección 5.1.3.2.2.

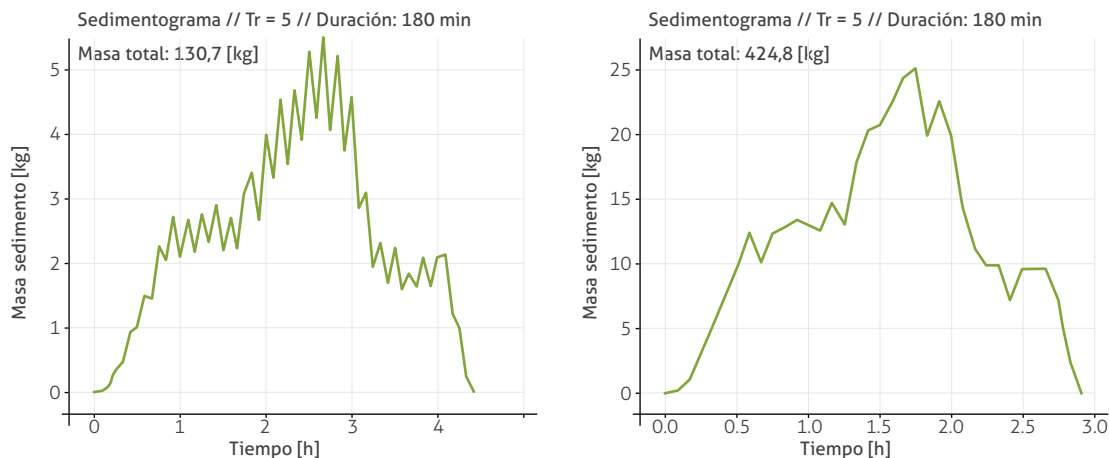
5.1.3. Productos de la estimación del volumen de material sólido que se incorpora al flujo

Los productos de la metodología de aporte de sólidos por erosión en laderas, deslizamientos, caídas de rocas y flujos, corresponden al volumen de entrada de material al proceso de transporte, arrastre y depósito que se describe en las secciones 5.2. y 6.2. Esta sección presenta el detalle de la entrega de sólidos estimados para las escalas de estudio 1:25 000 y 1.2000.

5.1.3.1. Sedimentos en el tiempo provenientes de erosión de laderas asociados a periodos de retorno

El producto principal del modelo propuesto es el sedimentograma en unidades de masa dividido tiempo para cada una de las unidades de modelación generadas a partir del área de estudio. Una de las principales suposiciones al momento de modelar los sedimentogramas es que estas unidades de respuestas hidrológicas están en un estado inicial pasivo en el cual no hay producción de sedimentos y solo generan sedimentos en suspensión frente a un impulso de precipitación que provoca la erosión. Por lo anterior, los sedimentogramas iniciarían únicamente por efecto de la precipitación y terminarían una vez ésta finalice; posteriormente, los sedimentos generados serán transportados por la precipitación efectiva del modelo hidrológico. Además, se recomienda simular condiciones de saturación previa, suponiendo que el suelo tiene un alto contenido de humedad y que fue sometido a un periodo prolongado de lluvias, modificando el comportamiento de la tasa de infiltración y aumentando la producción de escorrentía.

Los sedimentogramas generados coincidirán con cada escenario propuesto, es decir, los periodos de retorno para los que están construidas las curvas IDF (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500). Estará a criterio de los modeladores definir la duración del evento de precipitación (hietogramas de diseño), puesto que estos definen qué



» **Figura 29.** Sedimentogramas de la cuenca de la quebrada Surcabasiga, Guacamayas, Boyacá Para una tormenta de 180 minutos de duración, para los periodos de retorno: 5 y 300 años

tan abrupta será la caída de la lluvia en la zona modificando las intensidades y, por consiguiente, la degradación del suelo. En la figura 29 se presentan ejemplos de sedimentogramas para periodos de retorno de 5 y 300 años para una tormenta de diseño de 180 minutos de duración (3 horas).

5.1.3.2. Volumen de sólidos provenientes de deslizamientos, caídas de rocas y flujos

En esta sección se detalla la entrega de los volúmenes de sólidos por deslizamientos, caídas de rocas y flujos, tanto para la opción del modelo espacial de estabilidad de taludes (figura 25, opción 1) como para la opción del modelo de relaciones de gradientes e información de campo (figura 25, opción 2), hacia la simulación fluidodinámica abordada en las secciones 5.2. y 6.2.

5.1.3.2.1. Volumen de material de aporte del modelo espacial de estabilidad de taludes para usar a escalas 1:25 000 y 1:2000

El modelo espacial de estabilidad de taludes tiene como producto un archivo en formato *raster* donde en cada celda del MDT se indica el valor del volumen movilizado para las celdas con factores de seguridad iguales o inferiores a 1. En la escala de estudio 1:25 000 se realiza la entrega de sólidos de aporte y el modelo fluido-

dinámico tiene la opción de tener en cuenta o no el material de aporte por socavación de lecho desde cada una de las celdas hasta el cauce principal de las unidades de modelación y a lo largo de la zona de tránsito. En caso de no contar con un modelo fluidodinámico que permita la entrada de información en formato *raster*, se pueden acumular los volúmenes en el punto de cierre de las unidades de modelación. En la escala de estudio 1:2000, los sólidos generados por la estabilidad de laderas deben ser movilizados en la simulación fluidodinámica teniendo en cuenta la socavación de lecho.

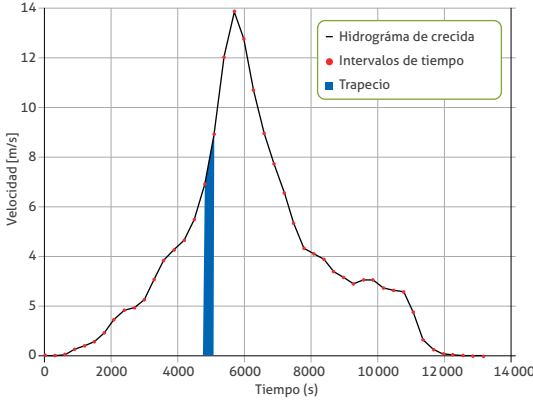
5.1.3.2.2. Volumen de material de aporte de la estimación de sólidos con información de campo y relaciones de gradientes para usar a escalas 1:25 000 y 1:2000

El volumen calculado de la aplicación de la metodología de estimación de sólidos de aporte por deslizamientos, caídas de rocas y flujos (V_s) ajustado con el factor aplicado a sólidos (F_{sol}) para cada periodo de retorno, se entrega desagregado en cada punto de cierre de las unidades de modelación para diferentes intervalos de tiempo, siguiendo la distribución de los hidrogramas de creciente propias del escenario de análisis propuesto (sección 4.5.1.)

En los hidrogramas el volumen de aporte de sólidos es desagregado considerando las diferen-

tes duraciones y distribuciones de caudal líquido para cada periodo de retorno (figura 30) y se procede a calcular en cada intervalo de tiempo el área bajo la curva con la ecuación (18).

$$A_t = \frac{Q_{(i+1)} + Q_{(i)}}{2} \Delta t \quad (18)$$



» **Figura 30.** Hidrograma de caudal líquido

Donde A_t es el área del trapecio, $Q_{(i+1)}$ es el caudal líquido en el tiempo $(i+1)$, $Q_{(i)}$ es el caudal líquido en el tiempo (i) , y Δt es el intervalo de tiempo entre (i) e $(i+1)$.

Luego, se calcula el área relativa de cada trapecio con respecto a la sumatoria de las áreas de los trapecios como se presenta en la ecuación (19).

$$A_r = \frac{A_t}{\sum_{i=0}^n A_t} \quad (19)$$

Donde A_r es el área relativa, $\sum_{i=0}^n A_t$ es la sumatoria del área de los trapecios desde (i) hasta el número total de trapecios (n) .

El volumen de sólidos asignado a cada trapecio se calcula como se muestra en la ecuación (20).

$$V_r = A_t \times V \quad (20)$$

Donde V_r es el volumen de sólidos relativo, y $V = V_s \times F_{sol}$ es el volumen de aporte de sólidos por deslizamientos, caída de rocas y flujos en

cada microcuenca corregido para cada periodo de retorno.

Por último, el caudal de sólidos se calcula a partir de la ecuación (21) para cada intervalo de tiempo a partir del hidrograma de crecida.

$$Q_{s(i+1)} = \frac{2V_r}{\Delta t} - Q_{s(i)} \quad (21)$$

Donde $Q_{s(i+1)}$ es el caudal sólido en el tiempo $(i+1)$, y $Q_{s(i)}$ es el caudal sólido en el tiempo (i) .

Los valores de caudal sólido para cada intervalo de tiempo se entregan en el punto de cierre de cada unidad de modelación hasta completar la duración de la simulación fluidodinámica. Finalmente, se obtiene una distribución temporal de sólidos para cada uno periodo de retorno, siendo el producto para las escalas de estudio 1:25 000 y 1:2000.

5.2. Modelación fluidodinámica a escala 1:25 000

En esta fase de análisis se estudiará el comportamiento fluidodinámico de una avenida torrencial en su etapa de transporte y depósito. Entiéndase por *transporte* el proceso que se produce justo después de que los sólidos empiezan a ser movilizados por la acción del agua en un cauce bien definido. Debido a las altas velocidades del flujo que caracterizan a una avenida torrencial, se presenta un arrastre de sedimentos que produce un aporte importante de material sólido, el cual es incorporado al flujo. En la etapa de transporte, además de sólidos y agua se pueden movilizar elementos u objetos de todo tipo: árboles, vehículos, escombros, animales, etc. Este transporte de materiales culmina cuando se presenta una disminución de la pendiente en el terreno y, por tanto, se genera una zona de depósito en donde el flujo ha disipado su energía completamente, pues ha logrado un estado de reposo.

Debido a la amenaza que este proceso de transporte y depósito de materiales genera a la vida de las personas y la infraestructura, es importante desarrollar herramientas que permitan determinar o predecir el comportamiento de



estos procesos. Esto permitirá delimitar el área de depósito, en la cual se podrán identificar zonas de posibles daños, y se aportarán insumos para la toma de decisiones requerida para los ejercicios de ordenamiento territorial. Para representar el comportamiento de este proceso de transporte y depósito, se acude a la modelación fluidodinámica.

En este capítulo, se presenta la metodología para la construcción de los modelos fluidodinámicos que van a representar los procesos de transporte, arrastre y depósito de materiales a escala 1:25 000 (figura 31). Se generan los insumos requeridos para el ejercicio de modelación (sección 5.2.1.), los cuales se describen en el paso I, los diferentes tipos de modelos matemáticos que se pueden emplear con sus limitaciones y suposiciones (sección 5.2.2.), los cuales se describen en el paso II, y por último, los productos detalle generados por estos modelos (sección 5.2.3.), los cuales se describen en el paso III (figura 31).

5.2.1. Fuentes de información e insumos para la modelación fluidodinámica a escala 1:25 000

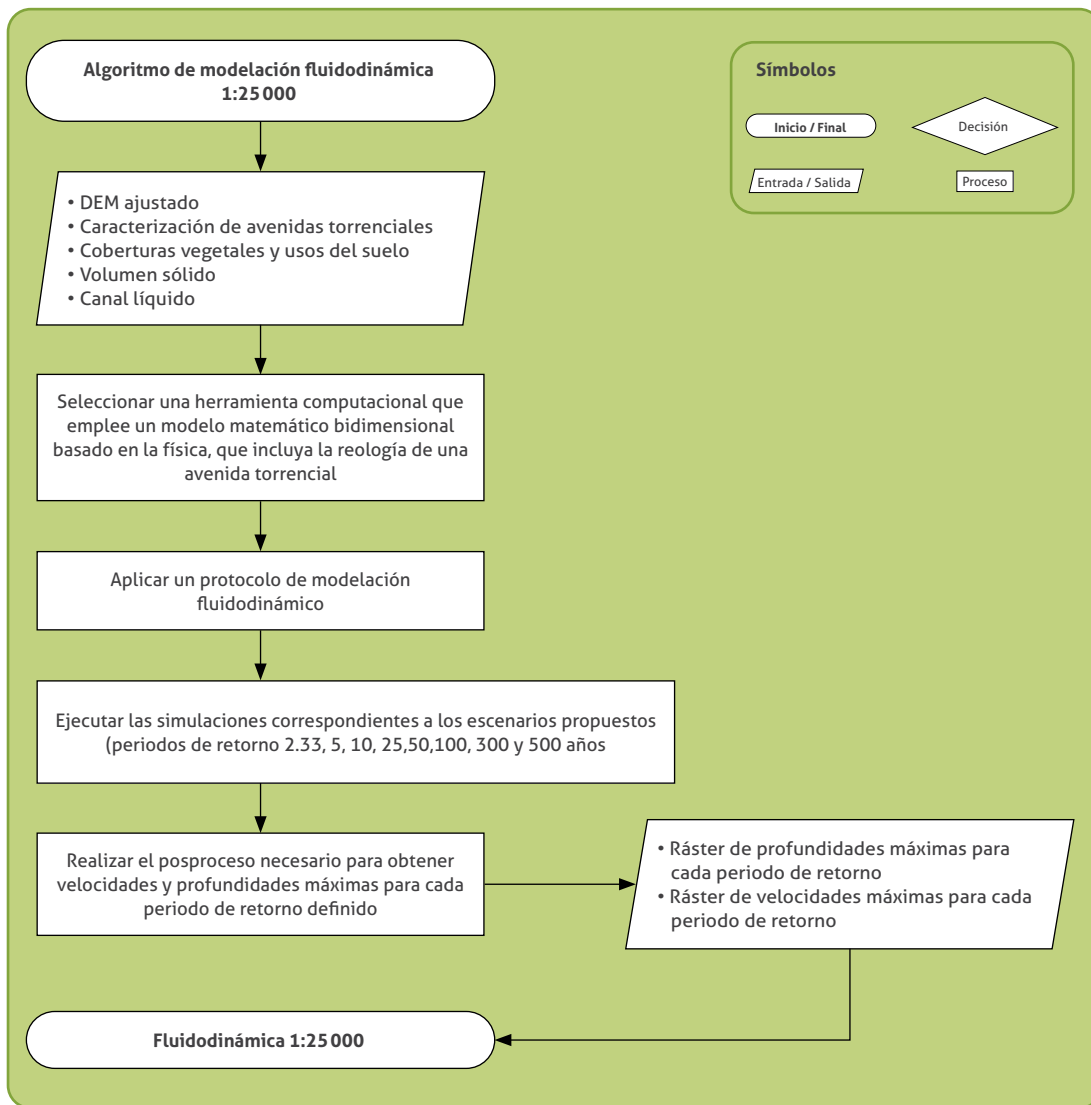
Dentro de esta sección se describen los insumos requeridos para el análisis de la etapa de

transporte, arrastre y depósito, los cuales son productos derivados de la caracterización de avenidas torrenciales (capítulo 3), productos de la iniciación (sección 5.1.) y productos de los detonantes (capítulo 4). Esta sección se encuentra incluida dentro del paso I que se describe en la figura 31.

5.2.1.1. Coberturas vegetales y usos del suelo.

Las coberturas vegetales y usos del suelo, que son producto de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017), permiten determinar la rugosidad de las superficies por donde el flujo transita. Este es un parámetro importante ya que a partir de este se pueden calcular los términos de resistencia al flujo que dependen de la reología del fluido (sección 5.2.2.1.). Por tanto, se sugiere aplicar lo descrito en la sección 3.2.3. *Cobertura de la tierra y usos del suelo*, específicamente las secciones 3.2.3.2.1. y 3.2.3.2.2. Estos apartados permiten obtener el insumo de la capa de usos del suelo actual, así como identificar áreas asociadas a zonas productivas, de conservación o protección.

Se asocia un coeficiente de rugosidad a cada una de las capas de cobertura y uso del suelo. Los



» **Figura 31.** Procedimiento para la modelación fluidodinámica a escala 1:25 000

coeficientes más utilizados son el de Manning, el de Chezy y el de Strickler. Para estimar el coeficiente de rugosidad se recomienda revisar la metodología propuesta por United States Geological Survey Water Supply (2016) junto con las propuestas realizadas por Dorn *et al.* (2014); Hossain *et al.* (2009); van der Sande (2001), sin dejar de lado la literatura tradicional como la de Chow *et al.* (1994).

5.2.1.2. Insumos del área de estudio

El insumo más importante es el modelo digital de terreno MDT seleccionado para el área de estudio. La sección 2.6. detalla las actividades propuestas para la revisión y eventual ajuste que se debe tener en cuenta para que este insumo represente la topología del relieve adecuadamente; pues la precisión topográfica, los métodos de corrección y la resolución son relevantes en los modelos fluidodinámicos y para replicar lo más cercano posible el proceso de flujo en el transporte, arrastre y depósito (Jarhani *et al.*, 2015). Además, lo que se presenta en las *geoformas in-*

dicativas (sección 3.2.1.2.) y *los sitios críticos o puntos de interés a lo largo del cauce* (sección 3.3.7.) son las fuentes de información con las que se podrá verificar y validar la modelación. Esta última es de especial interés, pues identifica tramos donde el canal varía abruptamente en forma, pendiente y trayectoria, con lo que también se podrá validar el MDT.

Además de las sugerencias presentadas en la sección 2.6., se deben tener en consideración las recomendaciones dadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) al evaluar la calidad del MDT (Resolución 471 de 2020 del IGAC). Específicamente se recomienda evaluar la totalidad, la exactitud absoluta de posición y la consistencia lógica. La *totalidad* consiste en el cubrimiento del área generada del MDT y su relación con respecto al área que se proyectó realizar, la exactitud absoluta de posición a la diferencia entre los valores altimétricos del MDT con los que se considera verdaderos, y *consistencia lógica* hace referencia a la resolución máxima recomendada. Se recomienda analizar la Resolución 471 del 2020 del IGAC para profundizar en estos conceptos.

En caso de no tener un modelo de elevación digital corregido se pueden presentar problemas como:

- » Desvíos del cauce principal o tributario, ocasionando una modelación fluidodinámica errada en el tránsito y arrastre. Pendientes mal representadas que generen áreas de depósito que no correspondan a una lógica espacial en el área de estudio, o direcciones del flujo erróneas.

Adicionalmente, el capítulo 2 propone varios insumos para el análisis del transporte, arrastre y depósito. Uno de los productos es la delimitación del *área de estudio* (sección 2.2.) donde se definen dos tipos de cuencas: la de análisis y la contribuyente. La primera se propone como una primera aproximación al área en la cual se van a realizar los ejercicios de modelación, sin embargo, dicha delimitación se debe complementar con las zonas de depósito para lo cual se cuenta con la información de las *geoformas indicativas*, los *sitios críticos o puntos de interés a lo largo*

del cauce y de las características o limitaciones que presenten las herramientas computacionales empleadas (tabla 16).

5.2.1.3. Insumos de la caracterización de avenidas torrenciales

En esta sección se presentan los insumos asociados a la caracterización de las avenidas torrenciales que serán de gran utilidad para los ejercicios de modelación. Estos insumos están relacionados con los sitios críticos, o puntos de interés, tipo de flujo a presentarse, geoformas indicativas, datos clave para determinar parámetros reológicos, e información adicional geográfica.

La caracterización de avenidas torrenciales descrita en el capítulo 3 propone varios productos que sirven como insumos para el análisis del transporte, arrastre y depósito a escala 1:25 000. Uno de ellos es el *inventario de avenidas torrenciales* (sección 3.3.1.) con el cual se logrará identificar los tipos de flujos y la recurrencia de los eventos que, sumado a la caracterización de las avenidas torrenciales en campo, proporcionan una aproximación de las propiedades del flujo, del cauce y del depósito (capítulo 3). Es pertinente comparar la información anterior con el cálculo de los índices morfométricos los cuales también permiten identificar el tipo flujo predominante de acuerdo con los valores presentados en la sección 3.2.1.1.2. Estos datos permitirán realizar consideraciones durante la construcción de los modelos de fluidodinámica, siempre que la herramienta computacional lo permita, de modo que se consideren sus efectos en los resultados de la simulación.

Los productos de *geoformas indicativas* (capítulo 3) contienen información sobre las zonas de tránsito y depósito que potencialmente puedan ser ocupadas por nuevos eventos torrenciales, esta información estará disponible para la escala cartográfica correspondiente a sus insumos — para este caso escala 1:25 000—; mientras que los sitios críticos se obtienen del análisis del índice de Hack y su posterior validación en campo (capítulo 3); aunque no tiene una escala cartográfica asociada, la información y su nivel de detalle pueden ser aplicados para este análisis a escala 1:25 000 y a escala 1:2000.

En la caracterización de las avenidas torrenciales en campo (sección 3.3.), la información relacionada con la textura y granulometrías de los depósitos y la distribución de los tipos o fases de flujo que se dan a lo largo de la zona de tránsito y cuáles se presentan en la zona de depósito, es un conjunto de datos que permite tener una aproximación de los valores para los parámetros en los modelos reológicos; esta información es de carácter detallado por su origen (levantamiento en campo). Además, para eventos recientes ocurridos en el área de estudio, se puede obtener información relacionada con los volúmenes, profundidades, áreas, velocidades, caudales, entre otras características de la avenida torrencial; datos que resultan importantes para los modelos basados en la física y para realizar la comparación con los modelos empíricos agregados (sección 5.2.2.2.).

También, será útil información como fotografías aéreas, imágenes de sensores remotos o cartografía básica 1:25 000 que contengan áreas planimétricas de depósitos de eventos ocurridos de los que se tenga registro, para conocer la extensión de la mancha del depósito o informes técnicos, noticias (reportes o vídeos) que permitan tener conocimiento de alturas en diferentes puntos del área de depósito o en caso tal que se tengan campos de velocidades o información de velocidades (dicha información debió ser recopilada en la caracterización de las avenidas torrenciales) (sección 3.1.).

Acudiendo a la utilidad de los SIG, se recomienda para los requerimientos de información cartográfica tener en cuenta lo mencionado en la sección 2.4.

5.2.1.4. Insumos de la estimación de volúmenes de sólidos

En el proceso de transporte, arrastre y depósito a escala 1:25 000, se requiere información e insumos obtenidos de los productos del proceso de iniciación (sección 5.1). Estos datos alimentarán los modelos fluidodinámicos y se debe tener en cuenta en las condiciones de cálculo. En la etapa de iniciación se calculan volúmenes provenientes de *erosión de laderas generados por la lluvia* (sección 5.1.3.1.) y *volúmenes de sólidos provenientes de deslizamientos y caídas de rocas* (sección 5.1.3.2.); cada uno de estos se calculan para cada

periodo de retorno y para cada unidad de modelación delimitada en la zona de estudio (sección 4.1.). Es importante aclarar que estos volúmenes deben ser entregados a la etapa de transporte, arrastre y depósito desagregados en el tiempo; así se obtendrá la variación del volumen sólido debido a erosión de laderas y la variación del volumen sólido debido a deslizamientos y caídas de rocas; luego, dependiendo del modelo seleccionado, es necesario sumar estos dos volúmenes para obtener una sola entrada de volumen sólido al modelo fluidodinámico.

5.2.1.5. Insumos de los detonantes

Esta guía considera la precipitación como principal detonante de las avenidas torrenciales, la cual, además de contribuir al aumento de caudales, también es un detonante de movimientos en masa. Para el análisis del transporte, arrastre y depósito se consideran como insumos los datos de la precipitación que detonan el evento. Esta información es ingresada con una variación temporal dada por el hietograma para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones del evento de precipitación. Las herramientas computacionales en la modelación fluidodinámica usan como insumo hidrógrafas para el caudal líquido y para el volumen sólido.

El modelo hidrológico propuesto en el capítulo 4, detalla la construcción de los siguientes productos: la hidrógrafa de creciente y el hietograma de diseño a partir de curvas IDF con periodos de retorno de 2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años. Las hidrógrafas de creciente se calculan para cada unidad de modelación (generadas a partir del área de estudio) y para cada escenario propuesto (periodos de retorno) donde la duración del evento de precipitación, expresado mediante el hietograma de diseño; se selecciona a partir de la duración de eventos anteriores. Si no existe esa información, debería seleccionarse por la duración de una tormenta típica en la zona de estudio. La información antes mencionada es ingresada en la herramienta computacional como condición de frontera o como una fuente de masa.

Los productos del modelo hidrológico tienen una resolución temporal subdiaria; a pesar de sus limitantes y consideraciones, que se abordan

detalladamente en el capítulo 4; no están sujetas a una escala cartográfica. Lo anterior permite que las hidrógrafas y hietogramas puedan usarse sin variaciones en las dos escalas de análisis que contempla este documento (escalas 1:25 000 y 1:2000). Sin embargo, el volumen de sólidos que se tiene en cuenta para escala 1:25 000 solo corresponde a los especificados en la sección 5.1.3.

5.2.2. Modelos fluidodinámicos para escala 1:25 000

Debido a las características mecánicas (reología) de los procesos físicos complejos que se presentan en los flujos asociados a las avenidas torrenciales, se deben utilizar diversas herramientas para determinar, calcular o predecir su comportamiento del modo más apropiado. En la presente sección



se describe el procedimiento metodológico que se debe llevar a cabo para representar matemáticamente la etapa de transporte, arrastre y depósito a escala 1:25 000. En las secciones anteriores se describieron de forma detallada los insumos con los que se debe contar para esta etapa. Ahora, de forma general, se describe el procedimiento que consta de la aplicación de dos diferentes tipos de modelos: los basados en la física y los empíricos. Cada una de estas herramientas proporciona insumos importantes y necesarios para la etapa del cálculo de frecuencia de ocurrencia y posteriormente la zonificación de la amenaza.

5.2.2.1. Modelos bidimensionales basados en la física

Cuando se habla de modelos basados en la física se refiere a todos aquellos que hacen uso de las leyes físicas de conservación (masa, *momentum* y energía). Para los modelos fluidodinámicos, estas ecuaciones son principalmente la de continuidad (masa) y la de *momentum* (Hervouet, 2007; Kundu y Cohen, 2002). Existen modelos matemáticos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales que intentan representar los cambios espaciales y temporales de las cantidades físicas asociadas a las leyes de masa y *momentum*. Cada uno de estos modelos matemáticos emplea diversas ecuaciones constitutivas para incorporar los esfuerzos adicionales que se presentan en una avenida torrencial; estas ecuaciones tienen en cuenta las diferencias de la densidad, la viscosidad, la concentración de los sedimentos y las características mecánicas de los sólidos incorporados al flujo (Iverson *et al.*, 1997; Takahashi, 2014).

Uno de los pasos más importantes en la modelación fluidodinámica es seleccionar el modelo matemático más apropiado para representar los procesos físicos. Si bien es cierto que existen modelos matemáticos unidimensionales que tienen en cuenta estos procesos, se considera que este tipo de modelos no representan de forma adecuada el comportamiento del flujo en las zonas de cambio de pendiente y en las zonas de los depósitos (zonas donde habitualmente se encuentran los centros poblados). Por otro lado, los tridimensionales presentan un planteamiento físico más completo, utilizando modelos matemáticos como las ecuaciones de Navier-Stokes, con lo que se obtendrán resultados precisos y confiables; sin embargo, el costo computacional asociado a estos modelos restringe su aplicación a dominios computacionales de pequeña escala impidiendo su uso en escalas 1:25 000 y 1:2000.

Con base en esto y teniendo en cuenta los propósitos de la metodología, se propone el uso de modelos matemáticos bidimensionales, promediados en la dirección vertical, que consideren la reología propia de una avenida torrencial, es decir que posean términos de resistencia al flujo que consideren la reología del fluido. Estos modelos estarán en la capacidad de calcular en forma aproximada las velocidades horizontales y las profundidades del flujo en cada punto del área de estudio. Regularmente las ecuaciones asociadas a estos modelos tienen el nombre de ecuaciones de Saint Venant 2D o ecuaciones de aguas someras (Hervouet, 2007; Jakob y Hungr, 2005; Kundu y Cohen, 2002). Las ecuaciones (22), (23) y (24) presentan en su forma conservativa las ecuaciones de aguas someras.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = P \quad (22)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hvu)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(Z_b + h)}{\partial x} + 9h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + F_x \quad (23)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(Z_b + h)}{\partial y} + 9h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + F_y \quad (24)$$

Fuente: adaptado de Hervouet (2007).

Donde:

- h altura de la superficie libre del fluido.
 u, v velocidad del flujo en la dirección-x y la dirección-y, respectivamente.
 Z_b nivel del lecho.
 g aceleración de la gravedad.
 ϑ viscosidad cinemática del fluido.
 P término fuente o sumidero de masa.
 F_x, F_y términos fuente o sumidero de *momentum*.

La ecuación (22) es de continuidad y la (23) y (24) son las de *momentum*. Por otro lado, los términos F_x y F_y son fuente o sumidero de *momentum*; en el caso de la modelación de una avenida torrencial estos términos fuente o sumidero son de gran importancia, ya que estarán asociados a los términos de resistencia al flujo que consideran la reología del fluido (Naef *et al.*, 2006). Por tanto, F_x y F_y consideran los esfuerzos

viscosos, los esfuerzos de fluencia, los esfuerzos debidos a choques entre partículas y la disipación de energía debida a la turbulencia. En la tabla 15 se muestran los términos de resistencia al flujo propuestos en la literatura que consideran estos esfuerzos adicionales.

Se debe tener en cuenta que dependiendo del tipo de flujo que se definió en la etapa de caracterización (capítulo 3), es decir, dependiendo de si es un flujo de detritos, de lodos o hiperconcentrado, se debe seleccionar la relación de resistencia al flujo más apropiado para realizar la modelación fluidodinámica. Para tal objetivo se pueden utilizar herramientas útiles como los números adimensionales que relacionan las fuerzas de colisión, las fuerzas viscosas, las fuerzas turbulentas y de fricción; algunos de estos números son el número de Savage, el de Bagnold, el de Reynolds, entre otros (Jakob y Hungr, 2005; Medina *et al.*, 2008; Naef *et al.*, 2006; Takahashi, 2014).

» **Tabla 15.** Términos de resistencia al flujo que consideran la reología de una avenida torrencial

Descriptor	Relación de resistencia del flujo	Términos F_x, F_y de resistencia del flujo
A	Bingham	$F_{x,y} = \frac{\tau_0}{\gamma h}$ $\tau_0 \text{ puede ser calculado por:}$ $2\tau_0^3 - 3\left(\tau_y + \frac{2\mu BV_{x,y}}{h}\right)\tau_0^2 + \tau_y^3 = 0$
B	Bingham simplificado	$F_{x,y} = \frac{\tau_0}{\gamma h}$ $\text{con } \tau_0 = 1.5\tau_y + 3\frac{2\mu BV_{x,y}}{h}$
C	Voellmy	$F_{x,y} = \frac{V_{x,y}^2}{C^2 h} + \cos \alpha \tan \delta$
D	Turbulento y Coulomb	$F_{x,y} = \frac{n^2 V_{x,y}^2}{h^{4/3}} + \cos \alpha \tan \delta$
E	Turbulento y fluencia	$F_{x,y} = \frac{n^2 V_{x,y}^2}{h^{4/3}} + \frac{\tau_y}{\gamma h}$
F	Turbulento, Coulomb y fluencia	$F_{x,y} = \frac{n^2 V_{x,y}^2}{h^{4/3}} + \frac{\tau_y}{\gamma h}$ $\text{Con } \tau_i = \min(\tau_y; \gamma h \cos \alpha \tan \delta)$
G	Cuadrático	$F_{x,y} = \frac{n^2 V_{x,y}^2}{h^{4/3}} + \frac{k\eta V_{x,y}}{8h^2 \gamma} + \frac{\tau_y}{\gamma h}$
H	Coulomb viscoso	Bingham con $\tau_y = \gamma h \cos \alpha \tan \delta$

Fuente: modificado de Naef *et al.* (2006).

Donde:

F_x, F_y	términos fuente o sumidero de momentum.
τ_x, τ_y	esfuerzos de corte y fluencia respectivamente.
γ	peso específico del fluido.
h	profundidad del flujo.
$v_{x,y}$	velocidad del flujo en la dirección x o y.
C, n	coeficiente de Chezy y de Manning respectivamente.
α, δ	pendiente longitudinal del cauce y ángulo de fricción respectivamente.
k	parámetro de resistencia para flujo laminar.
η	viscosidad dinámica del fluido.

Existen diversas herramientas computacionales que resuelven las ecuaciones bidimensionales promediadas en la vertical y que consideran la reología propia de una avenida torrencial, algunas de estas herramientas son de distribución gratuita, otras son de tipo comercial. En la tabla 16 se presentan algunas las herramientas que pueden ser utilizadas en la modelación fluidodinámica de una avenida torrencial. Se presentan características de los modelos como el número de fases que utilizan, la relación de resistencia al flujo y observaciones generales de cada herramienta.

El profesional a cargo de la aplicación de estos modelos bidimensionales deberá tener pleno conocimiento de las suposiciones y limitaciones que estos modelos presentan, incluso de las hipótesis que se aplican a las ecuaciones constitutivas que utilizan estos modelos.

Luego de la selección de la herramienta a emplear, se debe pasar a definir el área a simular o dominio computacional. En este punto es importante tener en cuenta las propuestas realizadas en el capítulo de caracterización de avenidas torrenciales para la delimitación de la zona de estudio (sección 3). El dominio computacional se debe establecer teniendo en cuenta todas las zonas donde se presente transporte del flujo y se debe incluir la zona de los depósitos antiguos (sección 4.1.). Luego, quien modele debe construir la malla computacional y definir la discretización temporal teniendo en cuenta la resolución de los insumos, el costo computacional y el error tolerado. Con respecto a estos dos últimos,

se recomienda realizar siempre una prueba de independencia de malla que permita verificar que la discretización espacial de la malla seleccionada no adicione error a los resultados, y que además sea la adecuada para representar los procesos físicos.

Debido a las altas velocidades que se pueden presentar en una avenida torrencial, se recomienda siempre tener control de las inestabilidades numéricas que puedan surgir en las simulaciones. Para ello se deben hacer constantes cálculos del número adimensional Courant-Friedrichs-Levy (CFL) (ecuación 25).

$$CFL = (|V_{x,y}| + \sqrt{gh}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (25)$$

Fuente: Hervouet (2007)

Donde:

$V_{x,y}$	velocidad máxima del flujo en la dirección x o y.
h	profundidad del flujo.
g	aceleración de la gravedad.
Δt	resolución temporal.
Δx	resolución espacial.

Es importante que quien modele tenga claro cuál es el esquema numérico que está siendo aplicado para la discretización de las ecuaciones, ya que esto determina cuál es el valor del CFL máximo permitido en una simulación. Usualmente, para evitar inestabilidades numéricas, se recomienda que el CFL se igual o menor a 1.

Dependiendo de la herramienta que se vaya a emplear, se requiere que las hidrógrafas (caudal líquido, volumen sólido) se ingresen de forma separada al modelo fluidodinámico, o en contraposición, que se ingresen como una sumatoria del caudal líquido proveniente de los detonantes y del volumen sólido. Por otro lado, existen herramientas computacionales que permiten ingresar el volumen sólido como una condición inicial indicando la zona exacta donde se generaron los deslizamientos, esto solo se podrá implementar en los modelos si se tiene buena información geotécnica que especifique la espacialización del volumen de los deslizamientos (sección 5.1.2.2.). En el momento de definir estas condiciones de

contorno en la modelación, es importante tener en cuenta la definición de área de estudio expuesta en la sección 2.2. Si se realiza una subdivisión en unidades hidrológicas, el volumen de agua y el volumen de sólidos proveniente de los deslizamientos y caída de rocas se debe ingresar al modelo como condiciones de contorno en las zonas altas de cada unidad hidrológica.

Luego el modelador deberá incluir, si es necesario, estructuras como puentes, *box culvert*, vertederos u otra estructura que pueda modificar el comportamiento del flujo de forma considerable; además, se deben considerar las observaciones que se realizan en los sitios críticos o puntos de interés a lo largo del cauce (sección 3), lo que permitirá identificar tramos donde el canal varía abruptamente en forma, pendiente y trayectoria. El siguiente paso deseable será implementar alguna estrategia de calibración y validación del modelo; para ello es relevante tener información de campo, como la mancha de inundación, profundidades o velocidades del flujo (sección 3.3.).

Finalmente se realizan las simulaciones propias de los escenarios que se han propuesto para la presente guía, específicamente los escenarios obedecen a ocho diferentes periodos de retorno (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años) (sección 4.4.1.). Por consiguiente, en la etapa de transporte, arrastre y depósito se deberán realizar ocho simulaciones, cada una de las cuales deberá dar como resultado las velocidades y profundidades máximas en cada elemento de la malla computacional (sección 5.2.3.). Como se ha descrito en las secciones anteriores, cada periodo de retorno

tendrá asociado un volumen de agua, un volumen de sólidos proveniente de inestabilidades causada por socavación lateral y un volumen de sólidos proveniente de la erosión de laderas. Adicionalmente a estos, la etapa de iniciación calcula un volumen proveniente de deslizamientos y caída de rocas (sección 5.1.). Estos volúmenes serán dados a la etapa de transporte, arrastre y depósito en forma de caudal y/o volumen disgregado en el tiempo.

Lo indicado corresponde al proceso metodológico para la etapa de transporte, arrastre y depósito a escala 1:25 000, es importante aclarar que debido a la complejidad de las ecuaciones diferenciales y a la extensión de la zona de estudio este proceso metodológico puede tardar de semanas a meses en ejecutarse, y dependerá también del modelo seleccionado y de la experiencia del modelador en aspectos teóricos y numéricos. Además de las recomendaciones generales de modelación dadas en el presente capítulo, es imprescindible que quien modele realice la aplicación rigurosa de un protocolo de modelación en fluidodinámica.

5.2.2.2. Comparación con modelos empíricos agregados

Luego de realizar la modelación con los modelos basados en la física, se recomienda comparar los resultados con ecuaciones empíricas que no presentan distribución espacial ni temporal. Estas se encuentran registradas en la literatura y han sido deducidas con información recolectada de campo de múltiples eventos registrados. Esta

» **Tabla 16.** Herramientas computacionales para modelación de avenidas torrenciales a escala 1:25 000

ID	Herramienta	Fase	Relación de resistencia al flujo	Distribución	Observaciones
1	FLO2D	Monofásico	Cuadrático	Comercial	Interfaz de usuario amigable
2	RAMMS	Monofásico	Voellmy	Comercial	Posee módulos para avalanchas, caídas de rocas y flujo de detritos
3	D-CLAW	Bifásico	Turbulento-Coulomb, intercambio de momentum entre fases	Gratuita	Código libre y gratuito, corre sobre sistema operativo GNU/Linux
4	FLATMODEL	Monofásico	Bingham, Herschel-Bulkley y Voellmy	Gratuita	Volúmenes finitos en malla estructurada
5	TITAN2D	Monofásico	Voellmy	Gratuita	Presenta una versión bifásica llamada TITAN2F
6	RIVERFLOW2D	Monofásico	7 modelos reológicos	Comercial	Volúmenes finitos en malla no estructurada
7	MASSMOV2D	Monofásico	Voellmy y Coulomb viscoso	Gratuita	
8	HEC-RAS	Monofásico	Bingham, Cuadrático, Herschel-Bulkley y Voellmy	Gratuita	Nuevo módulo de flujo de lodos y detritos. Interfaz amigable

comparación se propone con el fin de confrontar los resultados de los modelos basados en la física con estas ecuaciones empíricas, además de determinar órdenes de magnitud de las variables más importantes para caracterizar una avenida torrencial, como las velocidades medias, los caudales pico, la longitud de viaje y la longitud de los depósitos. Adicionalmente, es vital determinar la capacidad de transporte del evento en secciones transversales críticas, como por ejemplo en zonas donde se presenten estructuras hidráulicas o puentes.

En la literatura hay una gran variedad de ecuaciones empíricas que relacionan el volumen del flujo con el caudal pico o máximo que pueda presentar una avenida torrencial. En la tabla 17 se presentan ecuaciones deducidas de eventos ocurridos en Japón, Indonesia, China, Suiza, Canadá, Estados Unidos, entre otros países.

Los autores de las ecuaciones de la tabla 17 recomiendan que la ecuación (1) sea utilizada para flujo de detritos granulares, la ecuación (2) para flujo de lodos, y las ecuaciones (3) y (4) para flujo de detritos volcánicos. Adicionalmente, las ecuaciones (5), (6) y (7) han sido deducidas a partir de un análisis de rompimiento de presa, la ecuación (8) se recomienda utilizar para flujo de detritos.

» **Tabla 17.** Relaciones empíricas de caudal pico de una avenida torrencial

ID	Ecuación	Referencia
1	$Q_p = 0,135 M^{0,780}$	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
2	$Q_p = 0,0188 M^{0,790}$	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
3	$Q_p = 0,00558 M^{0,831}$	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
4	$Q_p = 0,00135 M^{0,870}$	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
5	$Q_p = 0,293 M_w^{0,56}$	Costa y Schuster (1988)
6	$Q_p = 0,0163 M_w^{0,64}$	Costa y Schuster (1988)
7	$Q_p = 0,3 B g^{1/2} H^{3/2}$	Hungr <i>et al.</i> (1984)
8	$Q_{p2} = 0,1 Q_{p1} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{0,833}$	Rickenmann (1999)

Fuente: Modificado de Rickenmann (1999).

Donde:

Q_p caudal máximo.
 Q_{p1} caudal pico de un flujo que contiene materiales similares a Q_{p2} pero de magnitud diferente.

Q_{p2} caudal pico del flujo que se está estudiando.
 M volumen del flujo.
 M_1 volumen del flujo que contiene materiales similares a M_2 pero de magnitud diferente.
 M_2 volumen del flujo que se está estudiando.
 M_w volumen almacenado detrás de la presa.
 B ancho de la rotura.
 g aceleración de la gravedad.
 H profundidad del embalse.

Seguido al cálculo del caudal pico, es importante realizar una estimación de la velocidad media del flujo. Para ello, en la tabla 18 se detallan una serie de ecuaciones para calcular la velocidad media para diferentes tipos de flujo y de materiales. Debido a que la recopilación de velocidades de una avenida torrencial en campo es una tarea difícil, las ecuaciones que se presentan en la tabla 18 han sido propuestas con base en datos empíricos de perfiles de velocidad recolectados y medidos en ensayos de laboratorio; por esto, deben tomarse con buen criterio, debido a las condiciones específicas con las que fueron generadas.

» **Tabla 18.** Relaciones empíricas de velocidad media de una avenida torrencial

ID	Tipo de flujo	Ecuación
1	Flujo laminar newtoniano	$V = \frac{1}{3\mu} \gamma H^2 S$
2	Relación tipo Bagnold	$V = \frac{2}{3} \xi H^{1,5} S$
3	Ecuación de Manning-Strikler	$V = \frac{1}{n} H^{2/3} S^{1/2}$
4	Ecuación de Chezy	$V = C H^{1/2} S^{1/2}$
5	Ecuación empírica	$V = C_1 H^{0,3} S^{0,5}$
6	Ecuación Rickenmann	$V = 2,1 Q^{0,33} S^{0,33}$

Fuente: modificado de Rickenmann (1999).

Donde:

V velocidad media del flujo.
 H profundidad del flujo máxima.
 S pendiente longitudinal del cauce.
 γ peso específico del fluido.
 μ viscosidad dinámica.
 ξ coeficiente dependiente de la concentración de los sedimentos.



n, C coeficiente de Manning y Chezy respectivamente.

C_1 coeficiente adimensional empírico.

Por último, se calcula la longitud de recorrido y la longitud o distancia del depósito, para lo cual se propone seguir las recomendaciones y ecuaciones empíricas deducidas por Rickenmann (1999). Estas están en función del volumen del flujo y de la diferencia en alturas entre el punto inicial y el punto más bajo del depósito (ecuaciones 26 y 27).

$$L_r = 1,9 M^{0,16} H_s^{0,83} \quad (26)$$

$$L_{pr} = 15 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1/3} \quad (27)$$

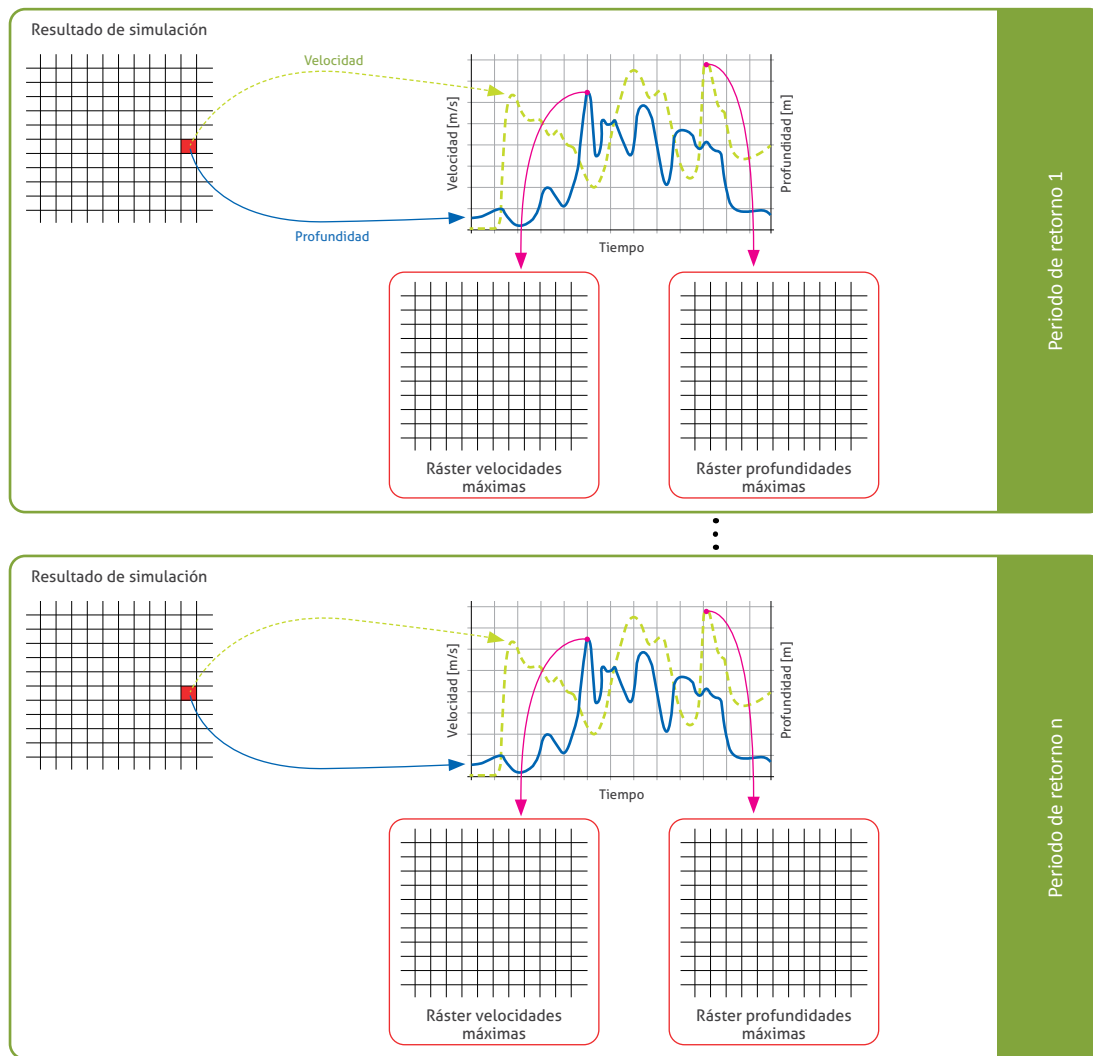
Donde:

- L_r longitud total de recorrido.
- M volumen del flujo.
- H_s diferencia de alturas entre el punto inicial y el punto más bajo del depósito.
- L_{pr} longitud del depósito.

5.2.3. Productos de la modelación fluidodinámica a escala 1:25 000

Luego de realizar la modelación con herramientas computacionales como las propuestas en la tabla 16, se debe realizar un posprocesamiento de los resultados. Por cada uno de los escenarios modelados se obtendrá un campo de velocidades y profundidades distribuido en el espacio y en el tiempo. A partir de estos resultados, se debe construir un *raster* de velocidades máximas y uno de profundidades máximas (figura 32). Es importante mencionar que estos *raster* de velocidades y profundidades máximas serán insumo esencial en la etapa de cuantificación de amenaza.

Es importante tener en cuenta que se realiza una simulación por cada periodo de retorno propuesto (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años), dando como resultado ocho diferentes campos de velocidad y profundidad que variarán en el tiempo y en el espacio. Por consiguiente, se deben elaborar en total 16 *raster*, 8 de velocidad máxima —uno por cada periodo de retorno— y 8 de profundidad máxima —uno por cada periodo de retorno (figura 32).



» **Figura 32.** Productos asociados a periodos de retorno de la modelación fluidodinámica

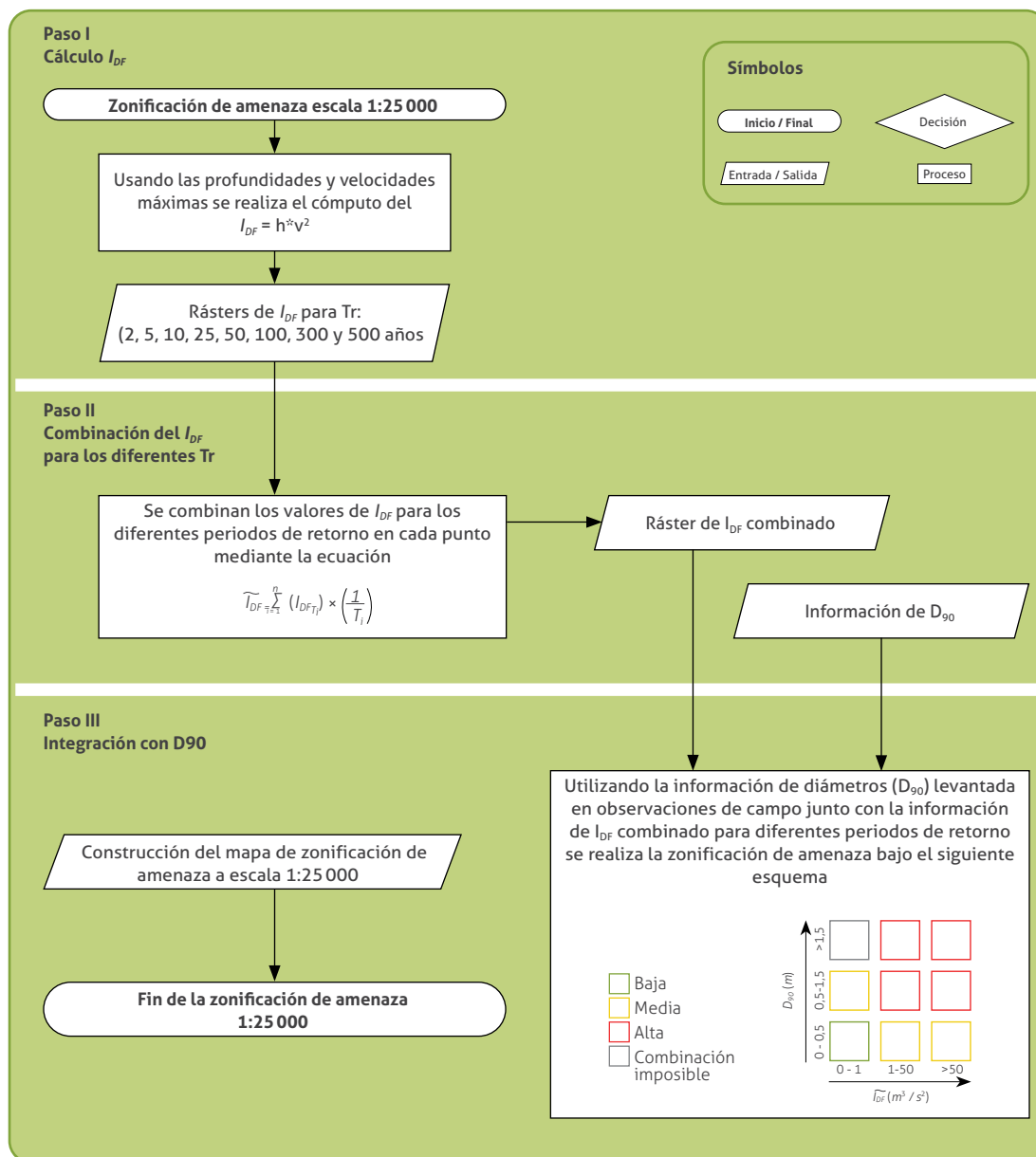
5.3. Cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000

El análisis de amenaza a escala 1:25 000 fue concebido como parte del proceso de evaluación de amenaza por avenidas torrenciales, con el objetivo de suministrar elementos de juicio para la toma de decisiones sobre la mejora y refinación de los insumos requeridos para la evaluación cuantitativa de la amenaza a escala 1:2000. Este capítulo describe el proceso de cuantificación de amenaza a escala 1:25 000 (figura 33), interpretándose como la posibilidad que tiene un

área de presentar un evento peligroso. Durante la descripción se puntualiza sobre los insumos, modelos y productos asociados específicamente a dicha evaluación.

5.3.1. Fuentes de información e insumos para la cuantificación de amenaza a escala 1:25 000

La evaluación de amenaza se basa en el desarrollo de las etapas descritas con anterioridad (caracterización de avenidas torrenciales en el capítulo 3, análisis de detonantes en el capítulo 4, estimación de sólidos en la sección 5.1. y modelación fluidodinámica en la sección 5.2.), utilizando algunos de los productos generados en



» **Figura 33.** Procedimiento para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales 1:25 000

estas fases como insumos directos de la propuesta metodológica de zonificación presentada. La primera consideración abordada es la selección de las variables relevantes para la caracterización de la amenaza —incluyendo la caracterización de la magnitud e intensidad de los eventos analizados— que pueden obtenerse a este nivel de detalle atendiendo además las limitaciones asociadas a la información y los procedimientos propuestos para la escala 1:25 000.

Una cierta variedad de índices y variables han sido utilizados para describir la intensidad —ayudando así a caracterizar la amenaza— de las avenidas torrenciales a lo largo del tiempo, comenzando por la descripción de energía cinética de la mecánica clásica para un cuerpo rígido, pasando por una variedad de expresiones empíricas o semiempíricas que diferentes autores han analizado. Aunque no existe un acuerdo sobre la mejor variable para la caracterización de las ave-

nidas torrenciales, la mayoría de las ecuaciones propuestas en la literatura comparten una característica fundamental: están escritas en función de la velocidad y la profundidad del flujo. La variable seleccionada para la evaluación de amenaza fue propuesta por (Jakob *et al.*, 2012), pues comprende y sustituye la fuerza de impacto, correlacionándose con el nivel de daño observado en diversas avenidas torrenciales en varios lugares del mundo. Recibe el nombre de *índice de intensidad de flujo* y se define como se muestra en la ecuación (28).

$$I_{DF} = h_{m\acute{a}x} \|\vec{u}\|_{m\acute{a}x}^2 \quad (28)$$

Donde:

$h_{m\acute{a}x}$ profundidad máxima del flujo.
 $\|\vec{u}\|_{m\acute{a}x}^2$ magnitud máxima de la velocidad del flujo.

Resulta oportuno notar que las consideraciones teóricas, de experimentación y de observación en campo, usadas para la definición de la variable que califica la amenaza, no se corresponden necesariamente con las capacidades de los modelos matemáticos y numéricos para reproducir las condiciones de velocidad y profundidad en un evento con determinadas características, por lo que cualquier índice obtenido por medio de un modelo numérico es una estimación que difiere, en cierta medida, de la realidad, especialmente cuando se trata de modelos sencillos que tienen simplificaciones importantes en términos de la reología y los procesos físicos que pueden representar.

Adicionalmente, contemplando que en la escala 1:25 000 se usarán modelos de flujo que no permiten representar un aspecto importante del proceso físico (arrastre y movilización del lecho), se opta por complementar la caracterización de los eventos para dicha etapa con una variable adicional, que permita tener en cuenta la posibilidad de que eventos con diferentes características puedan tener valores similares del índice seleccionado (p. ej., en un punto determinado, un flujo hiperconcentrado y un flujo de detritos que tienen la misma velocidad y profundidad son en realidad eventos con una intensidad y un potencial de daño diferente).

La variable adicional sugerida debe involucrar aspectos propios del flujo que modifiquen su intensidad. Una variable granulométrica se consideró conveniente y su selección se realizó analizando literatura con las posibilidades de información que estará disponible en este punto de la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales. La variable escogida es el D_{90} o D_{max} del material, pues se considera relevante en diferentes aspectos de la caracterización y, a la vez, representativo de los depósitos caracterizados.

Finalmente, dado que la evaluación debe incluir elementos que permitan estimar la frecuencia espacio temporal de los eventos caracterizados —en términos de intensidad y magnitud— usando ciertos valores o rangos de las variables mencionadas anteriormente, la propuesta elaborada incluye la frecuencia temporal considerando el hecho de que cada índice de intensidad de flujo con el que se realizará la evaluación está asociado a un valor de periodo de retorno.

En síntesis, de las etapas previas de la evaluación se requerirán directamente dos insumos:

- » Información para el cálculo del índice de intensidad de flujo (I_{DF}) para todos los periodos de retorno analizados, proveniente de la etapa de transporte, arrastre y depósito.
- » El valor zonificado de la variable granulométrica seleccionada o D_{max} (D_{90}), proveniente de la caracterización de avenidas torrenciales.

Los dos insumos se describen en las siguientes secciones con sus respectivas transformaciones.

5.3.1.1. Productos de la modelación fluidodinámica a escala 1:25 000 utilizados para la cuantificación de amenaza a escala 1:25 000

Como se explica en la sección 5.2. sobre transporte, arrastre y depósito, los modelos que componen la evaluación del transporte son aproximaciones numéricas con ecuaciones de gobierno basadas en la física (leyes de conservación). Los productos de dichos modelos se utilizarán como insumo del análisis de amenaza a escala 1:25 000.

Los modelos numéricos tienen que estar en capacidad de generar como resultado series de

tiempo de velocidades y profundidades de flujo para cada punto del espacio; asimismo, es posible generar un mapa o gráfico espacio temporal con los valores máximos de velocidad y profundidad alcanzados en cada celda del dominio computacional para cada simulación. El primer insumo requerido de esta etapa es un mapa de velocidades máximas y un mapa de profundidades máximas. Los resultados deben entregarse preferiblemente en un formato adecuado para su manejo en un sistema de información geográfica, de modo que el procesamiento posterior de la información sea más sencillo.

5.3.1.2. Productos de la caracterización de avenidas torrenciales utilizados para la cuantificación de amenaza a escala 1:25 000

La forma más razonable de obtener la variable granulométrica mencionada con anterioridad es mediante información de campo. Durante la caracterización de avenidas torrenciales (capítulo 3) se recolecta la información del tamaño de los materiales que conforman los depósitos, esta variable granulométrica puede ser correlacionable con el área de las geoformas, que generalmente se asocia a materiales geológicos equi-

valentes. Entre dicha información se encuentra una distribución de tamaños de la que se obtendrá el diámetro del material tal que el 90 % de las partículas tenga diámetros por debajo de dicho valor (D_{90}). El insumo específico será un producto cartográfico en el que se representen las áreas con los diferentes valores típicos de D_{90} . Las áreas en las cuales no existan depósitos ni otras evidencias que permitan estimar un valor tendrán consideraciones adicionales usadas para determinar un valor que permita su zonificación, dependiendo de sus condiciones específicas (secciones 5.3.2.2 y 5.3.3.2).

5.3.2. Procedimiento para la cuantificación de amenaza a escala 1:25 000

5.3.2.1. Índice de intensidad de flujo (I_{DF})

El índice de intensidad de flujo (I_{DF}) es la variable seleccionada como indicador tanto para la escala 1:25 000 como para la escala 1:2000, siendo la calidad y exactitud de los insumos y los modelos numéricos la diferencia más importante entre ambas estimaciones, como se discute en las secciones 5.2. y 6.2. Introducido por Jakob



et al. (2012), el I_{DF} tal como se presentó en la ecuación (28), es físicamente representativo de la fuerza de impacto, y la evidencia presentada indica que es la que tiene mejor correlación con el nivel de daño de las estructuras expuestas, lo que da cuenta de su idoneidad como variable para caracterizar la intensidad de los eventos.

Para efectos de zonificación, se requiere un único valor de I_{DF} por celda, que entrará a la matriz de zonificación que condensa los tres insumos ya mencionados; sin embargo, el procedimiento presentado en la sección 5.2. considera múltiples escenarios asociados a diversos periodos de retorno, por lo que se requiere una estrategia que permita combinar todos los escenarios de cada celda y sintetizarlos en un solo valor de índice de intensidad de flujo. La estrategia propuesta se esquematiza en la figura 34, donde se muestra que el valor del índice de intensidad de flujo que se usará para la zonificación se obtiene multiplicando cada valor de I_{DF} por el inverso del periodo de retorno al que está asociado —que puede entenderse en términos de probabilidad—, sumando para todos los periodos de retorno analizados. La expresión matemática se asemeja a la esperanza matemática o valor esperado para el índice de intensidad de flujo, con la diferencia de que se trata de probabilidades de excedencia en lugar de probabilidades de ocurrencia. La ecuación (29), que también está incluida en la figura 34, muestra la ecuación con la cual se puede calcular el índice de intensidad de flujo requerido para la etapa de zonificación.

$$\widetilde{I}_{DF} = \sum_{i=1}^n I_{DF_{T_i}} \times \frac{1}{T_i} \quad (29)$$

Donde:

- \widetilde{I}_{DF} índice de intensidad de flujo para la zonificación (asociado al valor esperado).
- $I_{DF_{T_i}}$ índice de intensidad de flujo que corresponde con el periodo de retorno T_i .
- T_i periodo de retorno.
- n número de periodos de retorno de análisis.

La estrategia descrita aplica a todas las celdas, pues en cada una de ellas hay diferentes valores de I_{DF} para cada periodo de retorno analizado.

Como resultado se obtiene un único valor de índice de intensidad de flujo al que se denomina en este documento con el símbolo \widetilde{I}_{DF} .

5.3.2.2. Variable granulométrica

Como se describió con anterioridad, tras considerar diversas alternativas se decidió que una variable relacionada con la granulometría es adecuada para el cumplimiento de los propósitos descritos. La revisión bibliográfica mostró que los tamaños de los grandes bloques son los más importantes en términos de la caracterización de la intensidad y magnitud. Hungr *et al.* (1984) describen que la magnitud del impacto de un flujo depende del *momentum* de la partícula más grande que entra en contacto con la estructura afectada; adicionalmente, mencionan que el tamaño del bloque que se moviliza con el flujo solamente está limitado por la capacidad de transporte del cauce, siendo entonces un buen indicador de la capacidad de transporte de un torrente determinado.

En el mismo sentido, Cui *et al.* (2015) reportan que la fuerza de impacto debida a los grandes bloques es cerca de 20 veces superior a la ejercida por la presión dinámica, observación que concuerda con las publicadas por He *et al.* (2016), quienes dividen la fuerza de impacto en tres componentes diferentes, siendo los grandes bloques el mayor contribuyente a la fuerza de impacto. Según estos resultados, se debe tener en cuenta el tamaño de dichos bloques; incluso se reflejan en algunos trabajos recientes relacionados con la cuantificación de fuerzas de impacto para la evaluación y el diseño de estructuras expuestas al paso de avenidas torrenciales (Liang y Xiong, 2019; Liu *et al.*, 2019). Adicionalmente, el diámetro máximo de los depósitos puede ayudar también en la caracterización de la magnitud de los eventos, pues se correlaciona positivamente con el volumen total y el caudal pico de estos (Suwa *et al.*, 1993).

A pesar de las observaciones mencionadas, algunos autores (p. ej., He *et al.*, 2016) usan valores diferentes al diámetro máximo de los bloques para realizar sus análisis. Esto se debe principalmente a dos factores importantes: el primero es que tomar el diámetro máximo puede conducir a sobreestimar los efectos del evento en general, considerando que el diámetro máximo puede no

ser representativo incluso dentro de un mismo depósito. El segundo es que, históricamente, la determinación en campo de los tamaños más grandes no ha sido suficientemente rigurosa y con frecuencia las distribuciones se encuentran sesgadas, pues se ignoran los tamaños más grandes presentes en los eventos (Iverson *et al.*, 1997), lo que dificulta usar la información de tamaños máximos proveniente de fuentes secundarias.

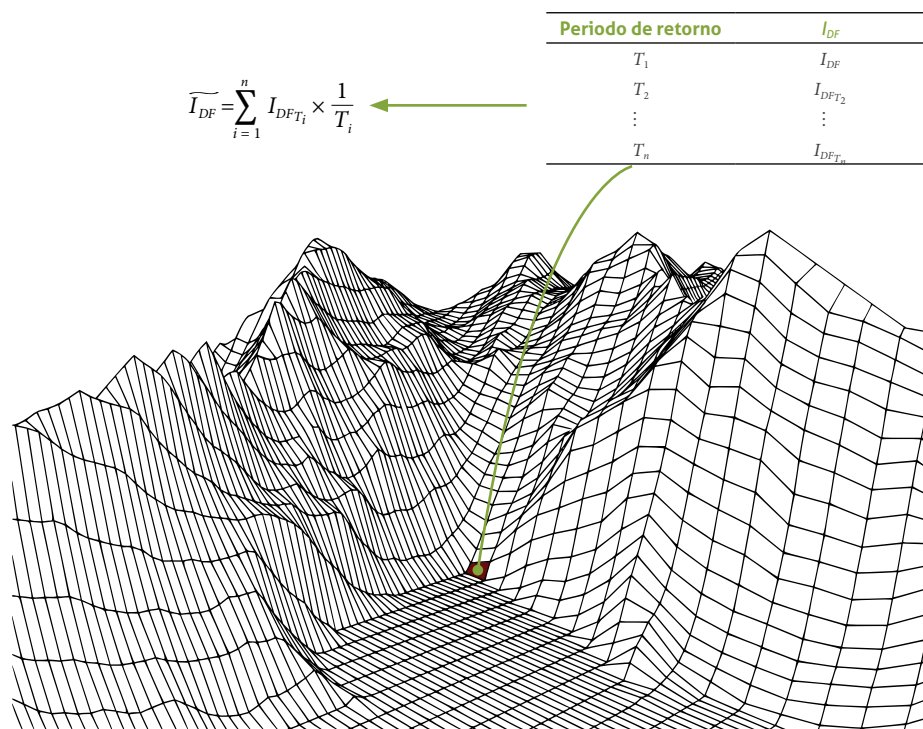
De los factores mencionados que presentan argumentos en contra del uso del tamaño máximo ($D_{máx}$), el segundo puede eludirse durante la evaluación propuesta en este documento, pues durante la etapa de caracterización se cuenta con información primaria y debe tenerse presente la importancia de la correcta determinación de la distribución de tamaños, incluyendo la fracción más gruesa de cantos y bloques. Sin embargo, considerando que el primer factor, que tiene que ver con la representatividad del $D_{máx}$, es una limitación importante (pues es imposible la realización del trabajo en campo con el mismo nivel de detalle de los resultados de los modelos numéricos), se optó por trabajar con el D_{90} , que

es un tamaño que brinda una mejor representatividad de un depósito de extensión considerable, evitando sobreestimar los tamaños presentes en la mayor parte del depósito, a la vez que considera que los bloques de mayor tamaño son los responsables de producir las mayores fuerzas de impacto. El uso del $D_{máx}$ o D_{90} dependerá del criterio experto y de que la distribución de los depósitos esté representado de la mejor manera.

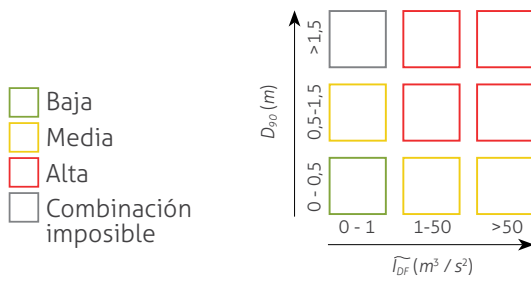
5.3.3. Productos de la cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000

5.3.3.1. Matriz de integración de los resultados de los modelos y sus categorías asociadas

Para combinar las variables mencionadas en el marco de la evaluación y zonificación de amenaza a avenidas torrenciales, se propone una matriz de integración que se muestra en la figura 35, donde cada una de las dimensiones de la matriz corresponde a uno de los insumos mencionados.



» **Figura 34.** Esquema de la estrategia para sintetizar los diferentes valores de índice de intensidad de flujo asociados a una celda cualquiera para obtener un valor único



» **Figura 35.** Matriz de integración para la zonificación de amenaza a escala 1:25 000

La matriz de integración mostrada implica que para cada combinación de las variables que entran en la propuesta existe una clasificación de amenaza establecida por medio de colores en la figura 35. Las casillas color rojo simbolizan la categoría de amenaza alta, las amarillas indican amenaza media y las verdes denotan amenaza baja. Por su parte, las casillas negras representan regiones que se consideran imposibles, pues significan que hay transporte de grandes bloques con velocidades y profundidades muy bajas, lo que va en contra de las condiciones bajo las cuales se transportan dichos materiales. La propuesta es usada para categorizar cada celda de acuerdo con los siguientes criterios:

- » El valor de D_{90} es un indicador de la magnitud e intensidad del evento, siendo diámetros mayores indicadores de eventos más intensos y con mayor potencial de daño; por tanto, indica mayor amenaza respecto de otros eventos con valores similares de las otras variables.
- » Cuando el índice de intensidad de flujo es mayor, la intensidad del evento es más grande, se correlaciona con el daño y, por tanto, mayores valores de I_{DF} implican mayor amenaza cuando los rangos de las otras variables son comparables.

5.3.3.2. Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales 1:25 000

Finalmente, acorde con la categoría obtenida para cada punto del espacio, se elabora un mapa para toda la zona de estudio. En este se especifica la categoría de amenaza (alta, media o baja) y se generan polígonos de las zonas de amenaza

media y alta que servirán como insumo previo a la definición de zonas a detallar a escala 1:2000.

5.4. Integración de zonificación de la susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales y zonificación de amenaza a escala 1:25 000

El objetivo de la integración entre la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales, a partir de la geomorfología y la cuantificación de la amenaza 1:25 000, es considerar dos aproximaciones distintas y que se pueden complementar mutuamente, lo que finalmente permitirá identificar las zonas donde se realizará la evaluación de amenaza a escala 1:2000.

5.4.1. Fuentes de información e insumos para la integración de resultados

Los productos que se deben integrar son:

- » Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales escala 1:25 000 (sección 5.3.).
- » Zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales a partir de la geomorfología (capítulo 3).
- » Puntos de interés a lo largo de la zona de tránsito (capítulo 3).

5.4.2. Procedimiento para la integración

La zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales a partir de la geomorfología indicativa debe estar clasificada según la categoría alta, media y baja con base en su temporalidad relativa, como se indica en la sección 3.2.1.2. Esa clasificación corresponde a la susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales con base en la génesis de las geoformas y su localización respecto al cauce actual. Teniendo listas la amenaza cuantitativa y la susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales, se debe hacer un álgebra de mapas donde se escoja el valor más alto de amenaza entre las dos. Dado que este procedimiento se hace a nivel de pixel, es necesario que ambas capas se encuentren rasterizadas a igual resolución.

5.4.3. Productos de la integración

El principal producto de la integración es el *raster* con la zonificación final de la amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000; este también debe involucrar a manera de rasgos geomorfológicos o de polígonos que representen los puntos de interés, como los sitios donde se pueden presentar represamientos, erosión lateral, avulsiones o cambios importantes de dirección, velocidad y/o descarga.

5.4.3.1. Zonas a evaluar en la escala 1:2000

En el marco del Decreto 1807 de 2014, las zonas a detallar a las que se refiere el literal b de su artículo 3 serán aquellas cuya evaluación de amenaza por avenidas torrenciales fueron categorizadas con amenaza alta y media. En estas zonas se realizará la evaluación de amenaza a escala 1:2000, para lo cual se deben llevar a cabo las siguientes actividades en campo:

» Caracterización de avenidas torrenciales

Tiene como objetivo definir el número de eventos recientes (< 500 años) registrados en las zonas a evaluar a escala 1:2000 a partir de la evidencia geológica, estimando sus magnitudes y describiendo las características sedimentológicas que permita clasificar los flujos que les dieron origen (flujo de detritos, flujo de lodos o hiperconcentrado). Para ello se debe tomar la cartografía de los eventos elaborada en la caracterización de avenidas torrenciales escala 1:25 000, y aumentar su detalle cartográfico a escala 1:2000. Por tanto, se recomienda tomar la caracterización hecha a partir de las trincheras o apiques en la escala 1:25 000 y correlacionar las facies o niveles de los depósitos encontrados en la exploración manual (trinchera o apique). Es importante resaltar que el inventario de avenidas torrenciales realizado en la escala 1:25 000 también debe ser incluido en el análisis de los eventos cartografiados a escala 1:2000. Se hace énfasis en la utilidad de las trincheras por ser el método de exploración del subsuelo más utilizado en la caracterización de depósitos fluviotorrenciales y aluviales (p. ej., Cílek *et al.*, 2012; Kerr Wood Leidal Associates Limited, 2004; Miall, 2014; Walling *et al.*, 1989), ya que permiten identificar cambios longitudi-

nales de las facies, estructuras sedimentarias y obtener una mejor descripción de la matriz. Por otro lado, es una técnica mucho más económica que otros métodos de exploración (perforaciones, entre otras). De igual manera, se propone realizar la granulometría del canal en la zona de depósito con el fin de complementar la variable granulométrica en las áreas del cauce, para lo cual se recomienda el método de Wolman por su practicidad en campo y por ser uno de los métodos de conteo más utilizados (Bunte *et al.*, 2009; Bunte y Abt, 2001; CDPHE, 2009; Harrelson *et al.*, 1994; Wolman, 1954).

Como se estudió en la sección 3.2.1. del “Reconocimiento de la historia fluviotorrenciales del territorio” se pueden obtener intervalos de recurrencia promedio a partir del inventario histórico de avenidas torrenciales y asociarle una magnitud en términos de área e incluso volumen, si la información secundaria lo permite. De igual forma, a partir del registro geológico y características particulares de la vegetación es posible determinar edades absolutas y así periodos de recurrencia de los eventos recientes que con la temporalidad relativa no se obtendrían. En este sentido y con el fin de consolidar un registro de edades más amplio de los eventos ocurridos en la cuenca, se aconseja el uso de técnicas como la dendrogeomorfología, radiocarbono, entre otras (Schneuwly *et al.*, 2013), si se quiere ahondar en el análisis multitemporal de la ocurrencia de avenidas torrenciales en el territorio.

» Estimación de sólidos

Para el desarrollo de las metodologías de cuantificación de volumen por deslizamientos y caídas de rocas, y socavación lateral se requiere información de campo para la estimación de espesores de las UGS, elementos morfométricos de la cuenca de estudio, granulometría y parámetros de resistencia del material de los depósitos a lo largo de la zona de tránsito. Los espesores de las UGS, utilizados como altura móvil (H) del material, pueden ser estimados a partir de trincheras, apiques, perfiles de meteorización u otra metodología en campo. Los elementos morfométricos del área de estudio —como la pendiente de las paredes del cauce y del cauce principal en los puntos de interés o zonas críticas donde se reali-

za la estimación de erosión lateral— pueden ser obtenidos de topobatimetría en el canal, con el fin de lograr un mejor detalle de las secciones transversales que serán utilizadas para el análisis de estabilidad de taludes y *cantilever* (bloque colgante). La granulometría del material de la zona de depósitos, en especial, si se identifica fracción gruesa y fina, y sus respectivos tamaños máximo y promedio, se podrá correlacionar con parámetros geotécnicos descritos en literatura (ángulo de fricción, cohesión y peso unitario). Sin embargo, en caso de tener la posibilidad de extraer muestras *in situ* para ejecución de ensayos de resistencia en laboratorio o sondeos geofísicos, serían mejores alternativas para la definición de propiedades de los materiales donde se va a realizar el análisis de estabilidad de las márgenes del cauce debido a la socavación lateral.

» Modelación fluidodinámica

Para la hidrodinámica, se requiere la siguiente información de campo:

- Granulometría del cauce. Toma de muestras del lecho en varios puntos de la que-

brada o río en estudio y en el depósito que se generó.

- Levantamiento batimétrico. Elevación del lecho de la quebrada en estudio.
- Toma de información de la mancha de inundación o del evento fluviotorrencial. Si se ha presentado algún evento previo, es importante tener la profundidad y el área de la mancha de inundación, depósitos o área urbana.
- Hidrometría. Información de los niveles de la lámina de agua y caudales de la quebrada o río en estudio (si aplica).

5.4.4. Interpretación de la zonificación final 1:25 000

La interpretación final de los resultados a escala 1:25 000 está altamente influenciada por la geomorfología y los depósitos encontrados en la zona; con esto es posible brindar una interpretación general. Desde el punto de vista de modelación y de la matriz de integración propuesta en la sección 5.3.3.1., la tabla 19 presenta la interpretación correspondiente a los niveles de amenaza de una zonificación.

» **Tabla 19.** Interpretación de las categorías de amenaza como parte de la leyenda sugerida a escala 1:25 000

Categoría	Descripción
Alta	Las zonas ubicadas en esta categoría tienen la posibilidad de presentar avenidas torrenciales con muy alto potencial destructivo, generalmente están asociadas a cauces con muy alta capacidad de transporte.
Media	Las zonas ubicadas en esta categoría tienen la posibilidad de presentar avenidas torrenciales con potencial destructivo medio a alto, la capacidad de transporte de los cauces que la generan suele ser alta.
Baja	Las zonas ubicadas en esta categoría tienen la posibilidad de presentar avenidas torrenciales, aunque usualmente con potencial destructivo limitado o bajo, la capacidad de transporte de los cauces es moderada.









Elujo hiperconcentrado
Cuenca del río Frio
Floridablanca, Santander, 2020
Fotografía de Michael Rangel



6

Caracterización de la amenaza a escala 1:2000



Quebrada Codeña
Vereda San Pablo
San Eduardo, Boyacá
Fotografía de Andrés Reyes

Para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000 se propone simular diferentes periodos de retorno que incluyan el transporte, arrastre y depósito de la mezcla del agua proveniente de la escorrentía con el material sólido que se desprende de las laderas y bancas de los cauces. Una vez realizadas las simulaciones, se debe calcular la distribución espacial de las curvas de amenaza (índice de intensidad de flujo vs. periodo de retorno), y con base en ella categorizar las zonas en amenaza alta, media y baja. Los resultados de la categorización en función de la curva de amenaza se integran con los depósitos recientes para obtener la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000. Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se describen los procedimientos propuestos en detalle.

6.1. Estimación de volúmenes de sólidos a escala 1:2000

Los volúmenes de material sólido de aporte para la escala 1:2000 corresponderán a los sólidos provenientes de erosión de laderas estimados en la sección 5.1.3.1., a los sólidos provenientes por deslizamientos, caídas de rocas y flujos estimados en la sección 5.1.3.2.; además, para esta etapa se determinarán los sólidos provenientes de las inestabilidades en los taludes, debido a socavación lateral del cauce que se explican a continuación.

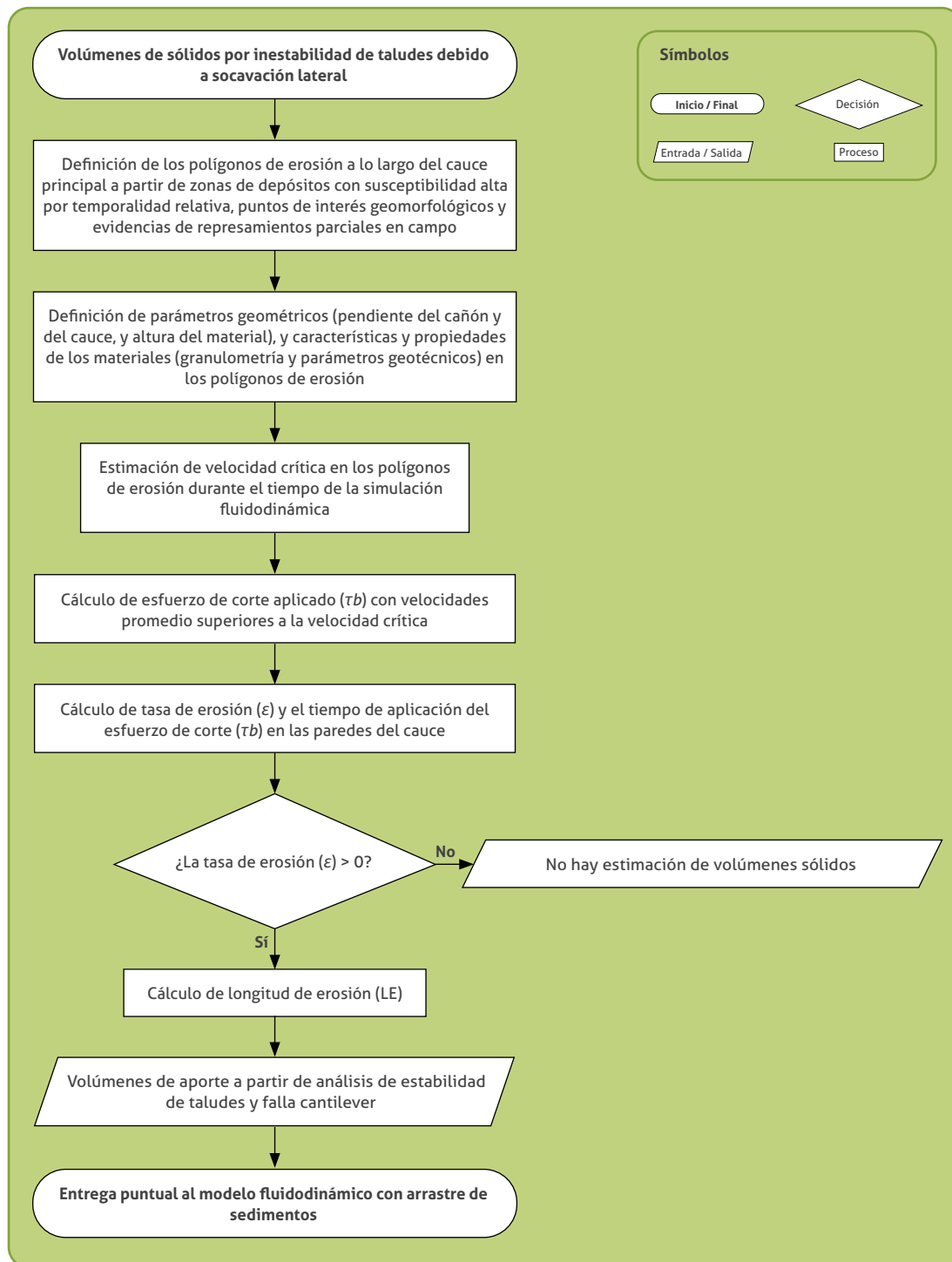
6.1.1. Procedimiento para la estimación de los sólidos provenientes de inestabilidades en los taludes debidas a socavación lateral del cauce

Una de las fuentes relevantes de aporte de sólidos a una corriente hídrica puede originarse del

proceso de erosión del material de las bancas del cauce por acción del flujo, lo cual, según Zhao *et al.* (2011), puede considerarse como uno de los principales factores que ocasionan inestabilidad en los taludes debido a la socavación en la base de la ladera. No solo la hidráulica del canal influye en la estabilidad del talud, sino también las propiedades del material que conforman las bancas del canal (Chow *et al.*, 1994). Por ello, algunos estudios abordan la predicción de velocidades de socavación en las paredes del cauce como resultado de procesos de la hidráulica fluvial y análisis de estabilidad de taludes que actúan conjuntamente (Darby *et al.*, 2007).

Cuando un fluido transita por un canal se generan unas fuerzas en la dirección del flujo que actúan sobre las paredes de las bancas del cauce. Dichas fuerzas aplican un empuje sobre el área de contacto del material, traduciéndose en un esfuerzo cortante (Chow *et al.*, 1994). Si las fuerzas de corte generadas por la acción del flujo resultan mayores que el esfuerzo admisible del material de banca, se inicia la movilización de sus partículas a lo largo del cauce. Este esfuerzo admisible o crítico depende de la densidad, forma, gradación y compacidad del material (Millet, 2011).

La contribución de material sólido a los drenajes como producto de la socavación lateral puede ser una importante carga que influye en el desarrollo de avenidas torrenciales (Midgley *et al.*, 2012). Por ende, la metodología para la cuantificación del volumen por socavación lateral tiene en cuenta las fuerzas tractivas generadas por el fluido y su influencia sobre la estabilidad del talud. A su vez, la metodología permite calcular la incorporación del volumen de los sólidos como aporte puntual en el modelo fluidodinámico, como se presenta en la figura 36.

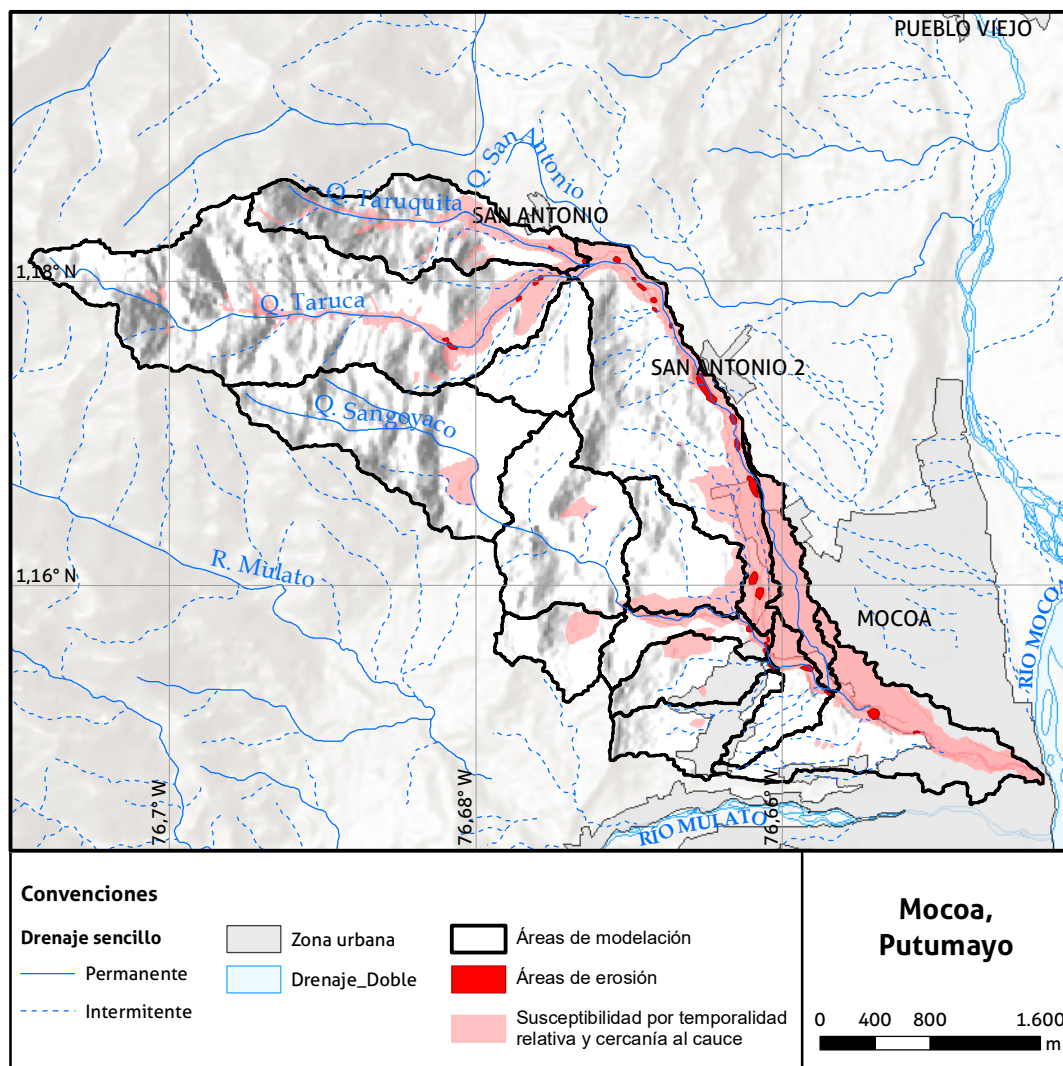


» **Figura 36.** Procedimiento para la estimación de volúmenes de sólidos por inestabilidad de taludes debido a socavación lateral

La aplicación de la metodología de aporte de materiales por socavación lateral inicia con la definición de los polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce, que puedan llegar a contribuir con material sólido al flujo. Dichos sectores se escogen de las geoformas indicativas de aporte de alta susceptibilidad por temporalidad relativa y por cercanía al cauce, descritos en el capítulo 3. A partir de la superposición de los rasgos geomorfológicos de zonas de erosión lateral fluvial que fueron interpretados y validados en campo, junto con los puntos anómalos del índice de Hack como indicativo de variación de resistencia de los materiales o cambios en el perfil longitudinal del canal, además de las zonas con represamien-

tos parciales, donde se evidencia disponibilidad de material para moverse a lo largo del cauce, se establecen los polígonos de erosión fluvial a los cuales se les realizaría el análisis de estabilidad de laderas y de bloque en voladizo o colgante, por acción de la erosión lateral fluvial, como se muestra en la figura 37. Las dimensiones de los polígonos se definen teniendo en cuenta la longitud de los tramos de 50m empleados para el cálculo del índice de Hack (índice del gradiente del cauce), y con la distancia desde el centro del canal o cauce principal hasta el rasgo de erosión sobre la margen que fue identificado en campo.

A partir de la definición de los polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce principal para



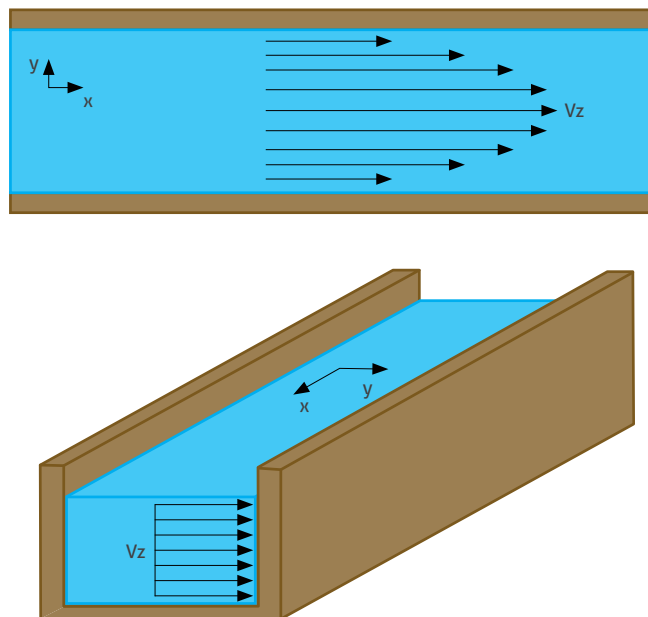
» **Figura 37.** Esquema de polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce principal

cada unidad de modelación, se propone realizar topobatimetrías si es el caso, con el fin de obtener secciones transversales que representen e identifiquen la geometría del canal, así como las pendientes de las paredes del cauce. La definición de espesores de los depósitos se toma de la caracterización de avenidas torrenciales (capítulo 3), lo cual puede tener una gran influencia en la superficie y mecanismo de falla en un análisis de estabilidad de taludes (Zuluaga y Sierra, 2012).

La definición de las características y propiedades de los materiales en los polígonos de erosión fluvial, como lo son la granulometría, el ángulo de fricción del material, la cohesión y el peso unitario, es necesaria para el desarrollo de la metodología de cuantificación de volumen por inestabilidad de taludes debido a socavación lateral fluvial. La distribución granulométrica puede obtenerse en campo a partir de la estimación de las fracciones gruesa y fina, donde se identifican tamaños promedios y máximos, y específicamente, el diámetro medio D_{50} . La definición de los parámetros geotécnicos se hace a partir de ensayos de campo como sondeos geofísicos, o incluso de la extracción de muestras del material para la ejecución de ensayos de clasificación y resistencia en laboratorio. Sin embargo,

en caso de no poder realizar el procedimiento anterior, se puede estimar el ángulo de fricción, la cohesión y el peso unitario del material (granulometría representativa en el polígono de erosión definido) a partir de valores de referencia o ecuaciones de correlaciones publicadas en la literatura y comúnmente aceptadas por la comunidad geotécnica. Algunos ejemplos de valores de referencia y correlaciones pueden encontrarse en Command (1986); Hoek y Bray (1981); Hough (1969); Sabatini *et al.* (2002); Smolczyk (2003), y Loehr *et al.* (2017).

El modelo matemático para la cuantificación de volúmenes de material por socavación lateral requiere estimar las velocidades y las alturas del flujo alcanzadas en diferentes instantes de tiempo en los polígonos de erosión fluvial. Para ello se propone realizar modelaciones fluidodinámicas empleando modelos basados en la física (secciones 6.2.2. y 5.2.2.1.) para cada periodo de retorno y de diferentes duraciones de lluvia, como se propone en el capítulo 4. La herramienta computacional que se seleccione para dichas modelaciones debe tomar en consideración la reología de los flujos asociados a una avenida torrencial (sección 6.2.2.). El objetivo de la modelación fluidodinámica es determinar la



» **Figura 38.** Distribución de velocidades de un fluido supuesta en el modelo fluidodinámico



velocidad crítica a partir de la cual se empieza a generar el proceso de socavación lateral en los polígonos de erosión durante el tiempo de la simulación. La capacidad de socavación del flujo se define a partir del esfuerzo de corte aplicado en las bancas del cauce principal (ecuación (32)). Por tanto, las velocidades que generen esfuerzos de corte mayores al esfuerzo crítico serán capaces de movilizar las partículas de material que conforman las bancas del cauce. Debido a que las herramientas computacionales propuestas en la sección 6.2. calculan un perfil de velocidades como el que se muestra en la figura 38, se propone realizar los cálculos del esfuerzo de corte aplicado con la velocidad media registrada en la sección transversal. Además de registrar las velocidades superiores a la velocidad crítica durante toda la simulación fluidodinámica, en cada uno de los polígonos de erosión, se debe registrar el intervalo de tiempo en que dicho rango de velocidades actúa sobre las bancas del canal.

Para determinar la magnitud de la velocidad crítica en cada uno de los polígonos de erosión,

es necesario igualar las ecuaciones de cálculo del esfuerzo crítico (τ_c) y del esfuerzo aplicado por el flujo (τ_b). El esfuerzo de corte crítico (τ_c) para materiales de banca tipo clastosoportados, donde el ángulo de fricción sea mayor que el ángulo de inclinación del talud de la banca, se debe calcular con la ecuación (30), la cual está en función de los parámetros del suelo (tamaño medio D_{50} , ángulo de fricción ϕ , peso específico de la fracción sólida G_s) y de la geometría de la banca (inclinación del talud θ en %). Para los casos en donde los materiales presentan ángulos de fricción menores que los de inclinación de las bancas, hay que emplear la ecuación (31), la cual está en función de la fracción de finos (FF en %), entendida como la proporción de material que pasa el tamiz No. 200 o 0,075 mm. En caso de que los materiales de banca sean matriz soportados con predominancia de fracción cohesiva y se estime que los ángulos de fricción del material sean mayores al ángulo de inclinación del talud de la banca, se debe calcular τ_c mediante las ecuaciones (30) y (31), y se escoge finalmente el menor valor.

$$\frac{\tau_c}{\gamma_w (G_s - 1) D_{50}} = 0.048 \tan \phi \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}} \quad \text{si } \phi > \theta \quad (30)$$

Fuente: Darby *et al.* (2007).

$$\tau_c = 0.1 + 0.1779 (FF) + 0.0028 (FF)^2 - 2.34E - 5 (FF)^3 \quad \text{si } \phi \leq \theta \quad (31)$$

Fuente: Julian y Torres (2006).

Donde, τ_c es el esfuerzo de corte crítico (Pa), γ_w es el peso unitario del agua (N/m^3), G_s es la gravedad específica de los sólidos, D_{50} es el tamaño medio del material de la banca, ϕ es el ángulo de fricción del material, θ es el ángulo de inclinación promedio de la banca del cauce (calculado como la relación entre un ΔY "diferencia de alturas del punto más alto de la margen o banca medido en la sección transversal al punto del cauce actual o más bajo" y ΔX "la distancia horizontal de los dos puntos usados para el ΔY ") y FF es el porcentaje de fracción fina del material de la banca.

El valor del cortante crítico (τ_c) se iguala con la definición del cortante actuante (τ_b) en la ecuación (32), con el fin de hallar la magnitud de la velocidad crítica $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ en los polígonos de erosión validados y para cada periodo de retorno. Para estimar el coeficiente de fricción del flujo C_f (ecuación 33) se emplea el valor de las alturas máximas de la lámina de agua en los polígonos de erosión fluvial alcanzadas durante toda la simulación fluidodinámica a escala 1: 25 000.

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho C_f (\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2})^2 \quad (32)$$

Fuente: Hervouet (2007).

$$C_f = \frac{2 \times g \times n^2}{h^{1/3}} \quad (33)$$

Fuente: Hervouet (2007).

Donde, τ_b es el esfuerzo cortante aplicado (Pa), ρ es la densidad del flujo (kg/m^3), \bar{u} y \bar{v} son las velocidades del fluido en las direcciones X y Y respectivamente (m/s), C_f es el coeficiente de fricción, g es la gravedad (m/s^2), n es el coeficiente de Manning, h es la profundidad de la lámina de agua.

Una vez se conoce la magnitud de la velocidad crítica $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ para cada uno de los polígonos de erosión fluvial para cada uno de los periodos de retorno, se calcula el promedio de las velocidades presentadas de la simulación fluidodinámica que superan dicho valor crítico. El valor promedio se toma como el de la magnitud de la velocidad actuante para el cálculo del esfuerzo aplicado por el flujo (τ_b) (ecuación 32).

Si el esfuerzo de corte aplicado en las paredes del cauce τ_b es mayor que el esfuerzo crítico τ_c , se produce una tasa de erosión en la banca que puede ser cuantificada utilizando la ecuación (34).

$$\varepsilon = K_d (\tau_b - \tau_c) \quad (34)$$

Fuente: Darby *et al.* (2007).

Donde, ε es la tasa de erosión de la banca por unidad de tiempo y unidad de área de banca (m/s), K_d es el coeficiente de erodabilidad.

El coeficiente K_d presenta varias limitaciones debido a que no hay un método teórico o empírico que determine el coeficiente de erodabilidad para suelos no cohesivos. Según Darby *et al.* (2007), para los materiales cohesivos, el parámetro de erodabilidad puede ser estimado con ensayos de campo a través de un dispositivo de prueba de chorro de agua dirigido hacia el suelo. Sin embargo, cuando no hay posibilidad de realizar este tipo de ensayos *in situ*, según Midgley *et al.* (2012), se emplea la ecuación (35), tanto para suelos cohesivos y no cohesivos, teniendo en cuenta que dicha ecuación fue desarrollada empíricamente a partir de resultados con muestras de suelos con cohesión.

$$K_d = \frac{2 \times 10^{-7}}{\sqrt{\tau_c}} \quad (35)$$

Fuente: Darby *et al.* (2007).

Finalmente, con la ecuación (36) se calcula la longitud de erosión fluvial en la banca en cada uno de los polígonos de erosión definidos a lo largo del cauce, teniendo en cuenta el intervalo de tiempo en el que actúa el promedio de la magnitud de la velocidad superior a la velocidad crítica durante la simulación fluidodinámica (figura 39).

$$LE = \varepsilon \Delta t \quad (36)$$

Fuente: Darby *et al.* (2007).

Donde, LE es la longitud de erosión de la banca (m), y Δt es el intervalo de tiempo en el que se presenta el promedio de la magnitud de velocidad superior a la velocidad crítica.

Para la estimación del volumen de aporte de sólidos para la escala detallada 1:2000, se propone un análisis de estabilidad de taludes y un análisis de falla por *cantilever* (bloque colgante) en las bancas de los polígonos definidos a lo largo del cauce principal donde se haya presentado una longitud de erosión LE . Esto permite cuantificar un aporte de sólidos de las bancas más detallado, basado en un análisis mecánico que involucra parámetros de resistencia del material y condiciones hidrometeorológicas que influyen su comportamiento en la estabilidad de laderas.

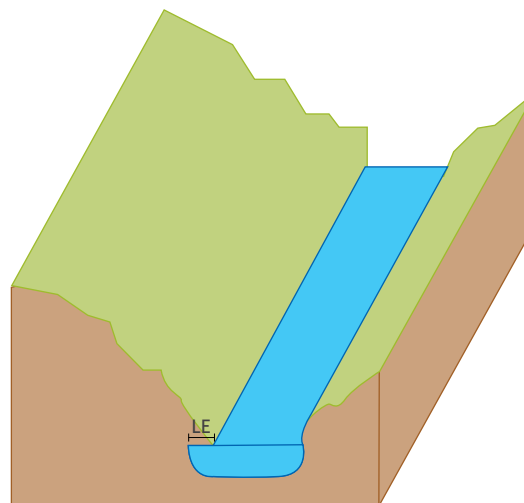
Para el análisis de estabilidad de las bancas del cauce debido a socavación lateral fluvial, no se considera el proceso de infiltración de la lluvia ni la variación del factor de seguridad en el tiempo, aunque si el experto geotecnista lo considera relevante por las condiciones particulares de la zona y cuenta con las propiedades geotécnicas del material para solucionar la variación del nivel freático y del perfil de succión en el talud en el tiempo, lo podrá incluir en el análisis. De forma conservadora se recomienda suponer que la posición del nivel freático coincide con el nivel más alto de la lámina de agua alcanzada durante la simulación fluido-dinámica.

La definición del factor de seguridad mínimo o crítico a partir del cual se presenta la condición de falla en la banca debe reflejar la incertidumbre de la información relacionada con los parámetros geotécnicos de los materiales y la geometría de la sección transversal de la banca. La definición del factor de seguridad mínimo debe sustentarse además en las recomendaciones disponibles en la literatura especializada y en el criterio del experto en geotecnia.

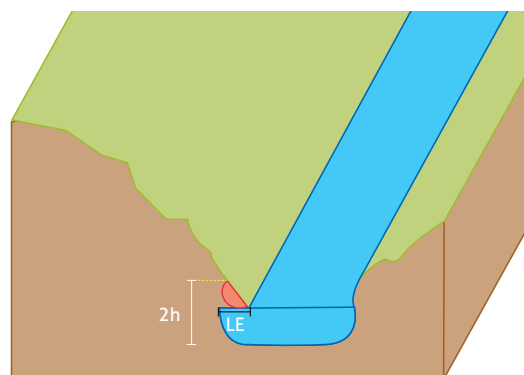
A partir de la morfología de la sección transversal para cada polígono de erosión (incluyendo la longitud de erosión (LE) medida desde el borde de la banca hacia su interior como se muestra en la figura 39) y la altura máxima de la lámina de agua (h) para cada período de retorno, se establecen los límites dentro de los cuales se deben explorar las superficies críticas de falla. Se recomienda que dichos límites estén contemplados entre el punto de inicio de LE sobre la cara del talud y el doble de la altura (h) intersectada con el borde de la banca, tal como se indica en

la figura 40. Luego, se asignan las propiedades geotécnicas de los materiales en la geometría de la sección, con el fin de estimar el factor de seguridad de la ladera por medio del análisis de equilibrio límite. Si el análisis de estabilidad genera superficies con factores de seguridad menores al crítico, el volumen de aporte de sólidos se calculará como el área de la sección de falla más grande en la banca (puede que no corresponda a la superficie con el factor de seguridad más bajo del análisis), multiplicada por la longitud del polígono de erosión fluvial analizado.

Para los casos donde se evidencie en campo que hubo movimientos en masa debido a la socavación lateral (represamientos totales o parciales a lo largo del cauce) y que al realizar el análisis



» Figura 39. Longitud de erosión de la banca por acción del flujo



» Figura 40. Definición de los límites de análisis para la estabilidad de la banca

de estabilidad de la banca no se haya presentado superficies de falla con factores de seguridad menores al crítico, se recomienda reducir los parámetros de resistencia del material para inducir la falla de la banca, siguiendo el juicio experto del geotecnista. La reducción de parámetros se sugiere en aquellas situaciones donde existe incertidumbre en la definición de los parámetros geotécnicos definidos a partir de información secundaria, literatura y criterio de experto.

Otros tipos de fallas por erosión en bancas pueden analizar la estabilidad de bloques en voladizo o *cantilever*, cuando se observe que los mecanismos de estabilidad por equilibrio límite de las bancas son seguros. Según Samadi *et al.* (2011), la erosión causada por las riberas de las fuentes de agua es un proceso previo para la formación de bloques colgantes en las orillas de los cauces. Por consiguiente, se propone el análisis de estabilidad por *cantilever*, como se muestra en la ecuación (37).

$$FS = \frac{L \times A}{\gamma \times A} \quad (37)$$

Fuente: Darby *et al.* (2007).

Donde, L es la longitud vertical del bloque colgante, c es la cohesión, γ es el peso unitario y A es el área de la sección transversal.

6.1.2. Sólidos provenientes de inestabilidades causadas por socavación lateral del cauce

Los productos de la aplicación de la metodología propuesta para la cuantificación de sólidos provenientes de inestabilidades causadas por socavación lateral del cauce, para la escala de detalle 1:2000, constituyen el aporte proveniente de bloques colgantes como resultado de la erosión en la base de las bancas y del análisis de estabilidad de laderas y bloque colgantes (*cantilever*) en los polígonos de erosión fluvial definidos a lo largo del cauce principal. A continuación, se detalla la entrega de los volúmenes de sólidos para la escala de estudio 1:2000 y su aporte puntual para la simulación fluidodinámica (sección 6.2.2.) para cada uno de los periodos de retorno.

6.1.2.1. Volumen a partir de estabilidad de taludes y falla por *cantilever* para usar a escala 1:2000

Para el procedimiento de cuantificación del volumen por socavación lateral a escala 1:2000, se deben identificar los polígonos de erosión a lo largo de la zona de tránsito donde se haya presentado una longitud de erosión (LE), y se lleva a cabo el análisis de estabilidad de laderas. Es necesario considerar el modo de falla de taludes que se puede presentar en las laderas y, en consecuencia, seleccionar la formulación adecuada a utilizar.

Si en el análisis de estabilidad de laderas el factor de seguridad es menor al crítico, se procede a calcular el volumen de la cuña movilizable como un aporte puntual al cauce (ecuación 38). Dicho volumen es considerado parte del estimativo de sólidos para la escala de estudio 1:2000.

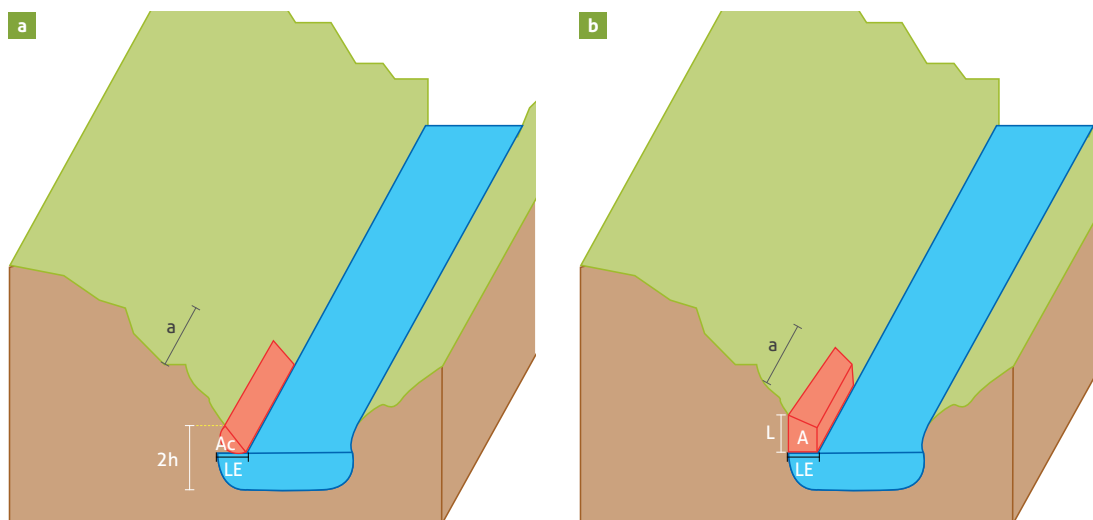
$$V = A_c \times \alpha \quad (38)$$

Donde, A_c es el área de la cuña de acuerdo con la superficie de falla supuesta, y α es la longitud del polígono de erosión paralela al cauce del río.

Sin embargo, si el factor de seguridad del talud es superior al crítico, se realiza adicionalmente el análisis de falla por bloque colgante (*cantilever*) en los polígonos de erosión establecidos a lo largo del cauce principal para cada unidad de modelación, como se presenta en la ecuación (37). Para este análisis es necesario haber obtenido previamente una longitud de erosión (LE).

Finalmente, si el factor de seguridad por *cantilever* es menor al crítico, se calculan los volúmenes de aporte de los polígonos de erosión a lo largo del cauce para cada una de las unidades de modelación con la ecuación (39), con el fin de considerarlo un ingreso puntual de sólidos para una simulación fluidodinámica. La suma de los volúmenes que se obtienen de la inestabilidad de laderas y falla por *cantilever* se asumen como el producto final de la escala de estudio 1:2000 (figura 41).

$$V = A \times \alpha \quad (39)$$



» **Figura 41.** Esquemas de aporte de volumen por acción de la socavación lateral
a) Inestabilidad de laderas, b) análisis de falla *cantilever*

Donde, A es el área de la sección transversal del bloque, y α es el ancho del polígono de erosión.

6.2. Modelación fluidodinámica a escala 1:2000

En esta sección se aborda la propuesta metodológica para la etapa de transporte, arrastre y depósito a escala 1:2000. El flujo de trabajo en esta etapa se presenta en la figura 42, el cual está dividido en tres pasos: el primero que hace referencia a los insumos, el segundo a los procesos de modelación y el tercero a los productos finales de esta etapa. Se requieren insumos secundarios y asociados a la caracterización de las avenidas torrenciales (sección 3.3.), insumos de los detonantes (sección 4.5.), insumos asociados a volúmenes de sólidos (sección 6.1.) e insumos de integración de zonificación geomorfológica y zonificación 1:25 000 (sección 5.4.). Luego, en el paso de procesos se propone ejecutar el análisis fluidodinámico de una avenida torrencial con modelos bidimensionales basados en la física que incluya la reología propia de estos flujos y que, además, sea capaz de representar el arrastre de sedimentos del lecho del río o quebrada a estudiar. En el último paso se realiza un post-procesamiento de la información resultante de la

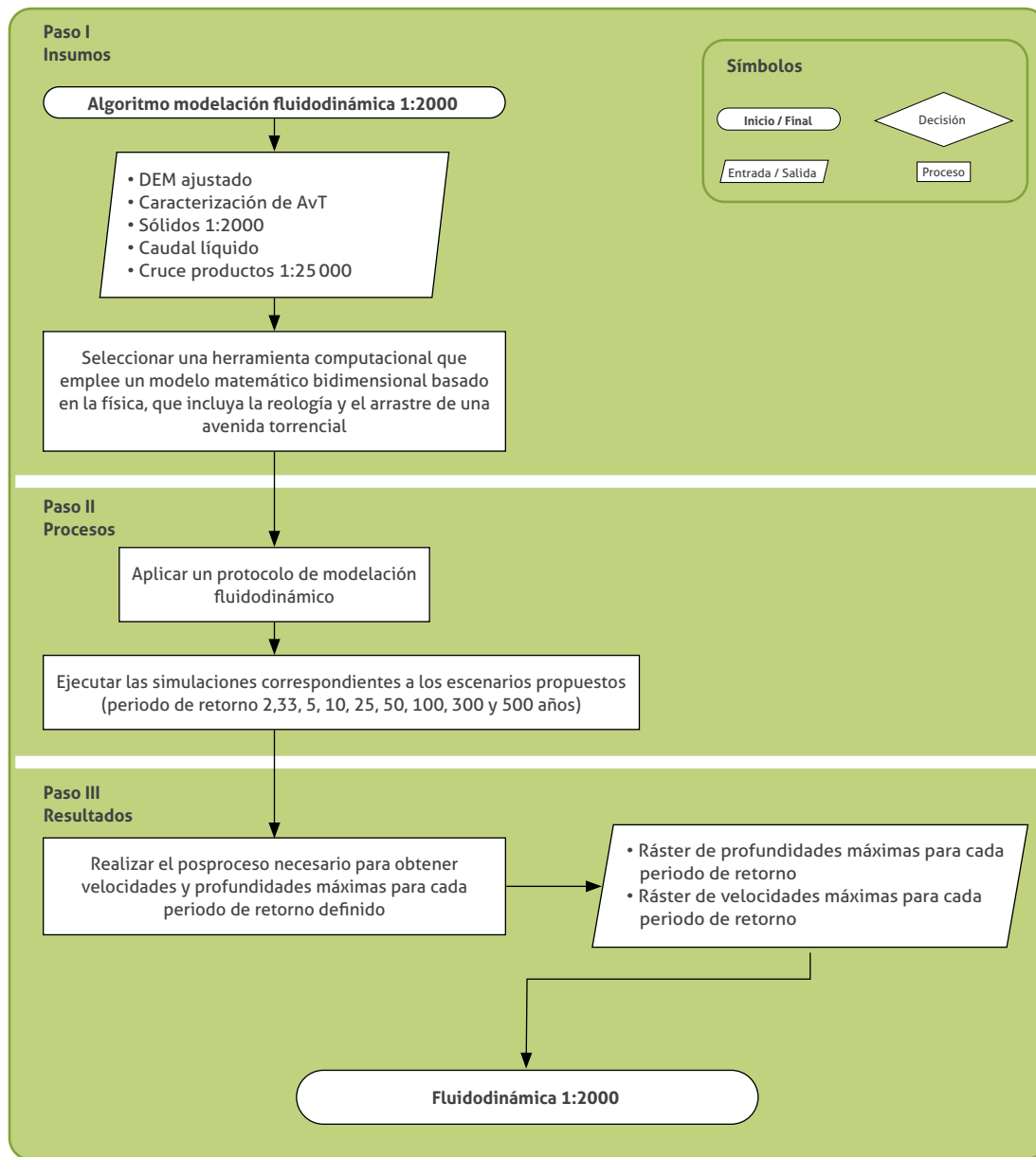
modelación para obtener los productos referidos en la sección 6.2.3.

6.2.1. Fuentes de información e insumos para la modelación fluidodinámica a escala 1:2000

Dentro de este subcapítulo se describen los insumos requeridos de los productos derivados de la caracterización de avenidas (sección 3.3.), insumos de detonantes (sección 4.5.) e insumos asociados a volúmenes de sólidos (sección 6.1.).

6.2.1.1. Coberturas vegetales y usos de suelo

Dentro de la simulación de escenarios a escala 1:2000 es necesario contar con un análisis riguroso para obtener información asociada a diferentes coberturas vegetales y uso del suelo en las áreas de depósito, y así tener en cuenta parámetros de la modelación fluidodinámica relativos a rugosidades que incrementan las fuerzas resistentes y desaceleran el flujo. Esta información que podrá ser complementada con los resultados del cruce de productos de la caracterización de avenidas torrenciales con la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales 1:25 000 será más exacta y precisa que la obtenida a escala 1:25 000 (sección 5.4.3.). Esto queda a criterio del modelador en caso de que requiera hacer



» **Figura 42.** Procedimiento para la modelación fluidodinámica a escala 1:2000

análisis de depósitos en zonas de conservación, zonas cultivadas o sea pertinente para el estudio que se esté llevando a cabo.

6.2.1.2. Insumos del área de estudio

El modelo digital de elevación MDE es sumamente importante en todo el proceso de transporte, arrastre y depósito. A una escala de detalle como lo es 1:2000, el MDE seleccionado para el área de estudio debe tener en cuenta las correcciones

presentadas en la sección 2.6., con el fin de garantizar que represente la topología del relieve adecuado, el detalle de la zona urbana, contar con una mayor precisión y así poder reproducir lo más cercano posible el proceso de flujo en el transporte, arrastre y depósito. El detalle en el casco urbano asegurará la calidad de movilización del depósito dentro de este.

Además de las sugerencias presentadas en la sección 2.6., se deben tener en consideración

las recomendaciones dadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en el momento de evaluar la calidad del modelo de elevación digital. Específicamente recomiendan evaluar la *totalidad*, la *exactitud absoluta de posición* y la *consistencia lógica* del MDE. La *totalidad* hace referencia al cubrimiento del área generada del MDE y su relación con respecto al área que se proyectó realizar; la *exactitud absoluta de posición*, a la diferencia entre los valores altimétricos del MDE con los que se considera como verdaderos, y la *consistencia lógica*, a la resolución máxima recomendada para el MDE. Se recomienda analizar la Resolución 471 del 2020 del IGAC para profundizar en estos conceptos.

6.2.1.3. Insumos de la caracterización de avenidas torrenciales y del cruce con la zonificación de amenaza escala 1:25 000

A lo largo de la sección 5.4. se propone realizar un análisis en función de los resultados de la caracterización de avenidas torrenciales (capítulo 3) y la zonificación de la amenaza a escala 1:25 000 (capítulo 5). El análisis del transporte, arrastre y depósito a escala 1:2000 contempla el arrastre de sedimentos, para lo cual requiere una herramienta computacional que incorpore este proceso físico (tabla 19). Sin embargo, las herramientas que cumplen estas características suelen requerir información más amplia sobre las propiedades del fluido y, en general, información con mayor detalle para que esta sea usada, aprovechando sus características más relevantes (por ejemplo, diferenciación entre varias fases del fluido).

Teniendo en cuenta que de este análisis deben surgir productos con mayor escala de detalle (1:2000), los insumos deben contar con al menos la misma escala de detalle. El diagnóstico preliminar contemplado en el capítulo 3 ya tiene información detallada levantada en campo, a saber: caracterización de avenidas torrenciales, geofomas indicativas del depósito y temporalidad relativa de los depósitos fluviotorrenciales, inventario de avenidas torrenciales y análisis multitemporal, y los sitios críticos o puntos de interés a lo largo del canal. Estos datos se deben

integrar con los productos del tránsito, arrastre y depósito a escala 1:25 000 (sección 5.4.3.), donde se plantean caracterizaciones de laboratorio para los materiales del depósito. Esta integración permitirá tener una aproximación más acertada sobre las propiedades reológicas de los materiales a incorporar en la modelación.

6.2.1.4. Insumos de la estimación de volúmenes de sólidos

Para la modelación fluidodinámica a escala 1:2000, se requieren los sedimentos en el tiempo provenientes de erosión de laderas asociados a periodos de retorno, el volumen de sólidos provenientes de deslizamientos, caídas de rocas y flujos (desagregación del volumen de material de aporte en el tiempo, siguiendo la distribución del histograma para usar a escala 1:2000) y el volumen de sólidos proveniente de inestabilidades de taludes causadas por socavación lateral del cauce (sección 6.1.). Lo anterior brindará información sobre la cantidad de masa sólida que transitará por los cauces desprendida de las laderas a lo largo del tránsito. En cuanto al producto de sólidos provenientes de inestabilidades causadas por socavación lateral del cauce (sección 6.1.2.), se obtiene un volumen de sólidos desagregado en el tiempo en zonas puntuales a lo largo del cauce dentro del área de estudio. Para la etapa de transporte, arrastre y depósito se considerará este volumen como una fuente de masa puntual.

En los modelos basados en la física, los parámetros reológicos cumplen un papel importante a la hora de calcular las pérdidas de *momentum* que se puedan generar en el flujo. En la sección 5.4.3. se exponen estos parámetros —como el ángulo de fricción interno—. Se sugiere que otros parámetros reológicos (ángulo de fricción basal, concentración de sedimentos en transporte o en depósito, etc.), que se deben introducir para las condiciones de cálculo en herramientas computacionales elegidas por el modelador, sean recopilados ya sea de la literatura, documentos técnicos asociados al área de estudio o levantados en campo (Takebayashi y Fujita, 2020; Egashira *et al.*, 2016). Si no es posible ninguna de las opciones anteriores, se recomienda realizar la calibración de dichos parámetros.

6.2.1.5. Productos de los detonantes utilizados para la modelación fluidodinámica

El modelo hidrológico propuesto en el capítulo 4 detalla la construcción de los siguientes productos: la hidrógrafa de creciente y el hietograma de diseño a partir de curvas IDF con periodos de retorno de 2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años. Las hidrógrafas de creciente se calculan para cada unidad de modelación (generadas a partir del área de estudio) y para cada escenario propuesto (periodos de retorno), donde la duración del evento de precipitación, expresado mediante el hietograma de diseño, se selecciona a partir de la duración de eventos anteriores. Si no existe esa información, debería seleccionarse por la duración de una tormenta típica en la zona de estudio. Estos datos se ingresan en la herramienta computacional como condición de frontera. Dependiendo de la herramienta escogida, se puede tener más de una condición de frontera (con su respectiva hidrógrafa) y pueden ser del tipo internas o externas.

Los productos del modelo hidrológico, a pesar de sus limitantes y consideraciones, no están sujetos a una escala cartográfica. Lo anterior permite que las hidrógrafas y hietogramas puedan usarse sin variaciones en las dos escalas de análisis que contempla este documento (1:25 000 y 1:2000). Sin embargo, el volumen de sólidos que se tiene en cuenta para escala 1:25 000 solo corresponde a los especificados en la sección 5.1.3.

6.2.2. Modelos fluidodinámicos para escala 1:2000

En la presente sección se describe el procedimiento metodológico que se debe llevar a cabo en la etapa de transporte, arrastre y depósito a escala 1:2000. En las secciones anteriores se expusieron, de forma detallada, los insumos con los que se debe contar para esta etapa. Ahora, se detalla el procedimiento que consta de la aplicación de un modelo bidimensional basado en la física que permita calcular el arrastre de sedimentos, con el cual se determinan las velocidades y profundidades del flujo en el área de estudio.

6.2.2.1. Modelos bidimensionales con arrastre de sedimentos

Se propone que a esta escala se realice la aplicación de modelos matemáticos más precisos y que consideren procesos físicos que no se tenían en cuenta a una escala 1:25 000. Uno de estos es el arrastre de sedimentos del lecho del río o quebrada, el cual puede incorporar un volumen importante de sólidos al flujo y por ende cambiar la composición y el comportamiento de una avenida torrencial (Hass y Woerkom, 2016), por lo que se propone emplear modelos matemáticos que consideren el arrastre de sedimentos del lecho. Existen modelos matemáticos de este tipo que suponen que el flujo es de una sola fase y algunos otros que lo suponen de dos o tres fases. La estructura matemática general de los modelos de una sola fase se presenta en la sección 5.2.2.1. En el caso de los modelos bifásicos se aplican leyes de conservación para cada una de las fases (líquido-sólido), esto quiere decir que posee ecuaciones de continuidad y de *momentum* para cada fase (en total seis ecuaciones: dos de continuidad y cuatro de *momentum*). Una de las suposiciones fuertes en este tipo de modelos es la de considerar que la fase sólida cumple con la hipótesis del continuo (Marchelli *et al.*, 2016; Pudasaini, 2012). Por otro lado, los modelos trifásicos proponen dividir los sólidos en dos fases, una para el material grueso y otra para los finos; en cuyo caso se tendrían nueve ecuaciones: tres de continuidad y seis de *momentum* (Pudasaini y Mergili, 2019).

Ahora, considerando que la concentración de los sedimentos, es decir la masa de sólidos por unidad de volumen, presentes en los flujos asociados a una avenida torrencial es elevado, y considerando que estos sólidos modifican drásticamente el comportamiento del flujo, se recomienda la aplicación de modelos matemáticos al menos de dos fases; sin embargo, se debe tener en cuenta el costo computacional que implica el uso de estos modelos matemáticos, la complejidad matemática y los requerimientos de información reológica. Por esta razón, se deja a criterio del experto el número de fases que considere apropiado en la modelación.

Existen diversas herramientas computacionales que resuelven las ecuaciones bidimensio-

nales monofásicas, bifásicas o trifásicas, y que consideran tanto la reología propia de una avenida torrencial como el arrastre de sedimentos de fondo, algunas de estas herramientas son de distribución gratuita otras son de tipo comercial. En la tabla 19 se presentan algunas herramientas que pueden ser utilizadas en la modelación fluidodinámica de una avenida torrencial a escala 1:2000. En esta tabla se detallan características de los modelos como el número de fases que utilizan, la relación de resistencia al flujo y algunas observaciones generales de cada herramienta.

Tal como se muestra en la escala 1:25 000, se deben realizar las simulaciones propias de los escenarios que se han propuesto para la presente guía, específicamente los escenarios obedecen a ocho diferentes periodos de retorno (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años). Por tanto, en la etapa de transporte, arrastre y depósito a escala 1:2000, se deberán realizar ocho simulaciones, cada una de ellas deberá dar como resultado las velocidades y profundidades máximas en cada elemento de la malla computacional (sección 6.2.3.).

Como se ha expuesto en las secciones anteriores, cada periodo de retorno tendrá asociado un volumen de agua, un volumen de sólidos proveniente de inestabilidades causada por socavación lateral, un volumen de sólidos proveniente de la erosión de laderas, y un volumen proveniente de deslizamientos y caída de rocas (sección 5.1.). Cada uno de estos será dado a la etapa de transporte, arrastre y depósito en forma de caudal

disgregado en el tiempo. Se debe mencionar que los tres volúmenes sólidos que se mencionan en esta sección deben ser ingresados a la modelación; sin embargo, debido a las diferencias que existen entre herramientas computacionales, la estrategia de cómo se ingresen estos volúmenes variará en todo caso, por consiguiente, es a criterio del modelador buscar la estrategia más apropiada para representar los procesos físicos de la mejor manera posible.

En la etapa de transporte, arrastre y depósito a escala 1:2000 aplican las mismas recomendaciones y sugerencias de modelación realizadas a escala 1:25 000. Es importante aclarar que, debido a la complejidad de las ecuaciones diferenciales y en función de la extensión de la zona de estudio, la aplicación del proceso metodológico puede tardar un tiempo significativo en ejecutarse, esto dependerá también del modelo seleccionado y de la experticia del modelador en aspectos teóricos y numéricos. Es imprescindible que quien modele realice la aplicación rigurosa de un protocolo de modelación fluidodinámica.

6.2.3. Productos de la modelación fluidodinámica a escala 1:2000

Del mismo modo que a escala 1:25 000, luego de realizar la modelación con alguna de las herramientas computacionales propuestas en la tabla 19, se debe realizar un posprocesamiento de los resultados. Por cada uno de los escenarios modelados se obtendrá un campo de velocidades y

» **Tabla 20.** Herramientas computacionales para modelación de avenidas torrenciales a escala 1:2000

ID	Herramienta	Fase	Relación de resistencia al flujo	Distribución	Observaciones
1	IRIC	Monofásico	Turbulento, Coulomb y fluencia	Gratuita	Interfaz de usuario amigable. Incluye solver Morpho2DH para flujo de detritos.
2	RAVAFLOW	Monofásico, bifásico y trifásico	Bingham plástico (fase líquida), Coulomb viscoso o visco-plástico (fase sólida fina), Coulomb plástico (fase sólida gruesa)	Gratuita	Corre sobre el sistema operativo GNU/Linux. Herramienta que considera la mayor cantidad de procesos físicos.
3	TRENT2D WG	Bifásico	Voellmy	Gratuita	Aplicativo que funciona en la nube. Soportado sobre Weezard.
4	RAMMS	Monofásico	Voellmy	Comercial	Posee módulos para avalanchas, caídas de rocas y flujo de detritos.
5	D-CLAW	Bifásico	Turbulento-Coulomb, intercambio de momentum entre fases	Gratuita	Código libre y gratuito, corre sobre sistema operativo GNU/Linux.
6	RIVERFLOW2D	Monofásico	7 modelos reológicos	Comercial	Volúmenes finitos en malla no estructurada.

profundidades distribuido en el espacio y en el tiempo; con estos resultados se debe construir un *raster* de velocidades máximas y uno de profundidades máximas. En la figura 32 se observa el procedimiento que se debe realizar; estos *raster* de velocidades y profundidades máximas serán insumo esencial en la etapa de frecuencia de ocurrencia.

Se debe recordar que se realiza una simulación por cada periodo de retorno propuesto (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años), esto dará como resultado 8 diferentes campos de velocidad y profundidad que variarán en el tiempo y en el espacio. Por lo tanto, se deben elaborar en total 16 *raster*: 8 de velocidad máxima —uno por cada periodo de retorno— y 8 de profundidad máxima —uno por cada periodo de retorno— (figura 32).

6.3. Cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000

Durante esta etapa de cálculo se obtiene un cálculo cuantitativo de la amenaza a escala 1:2000 (figura 43).

Aunque el alcance de la metodología no contempla el cálculo del riesgo, la metodología presentada pretende ser útil para la zonificación a nivel de amenaza, al mismo tiempo que permite que quienes la aplican tengan la posibilidad de continuar hacia la evaluación cuantitativa del riesgo, sin tener que cambiar la forma de evaluar amenaza o los productos asociados a esta etapa. En caso de que se decida continuar hacia la evaluación del riesgo, las curvas de amenaza generadas para cada punto del espacio se combinarán con las curvas de fragilidad o las curvas de daño para el cálculo del riesgo específico en cada porción del área, usando el resultado para el cálculo del riesgo total.

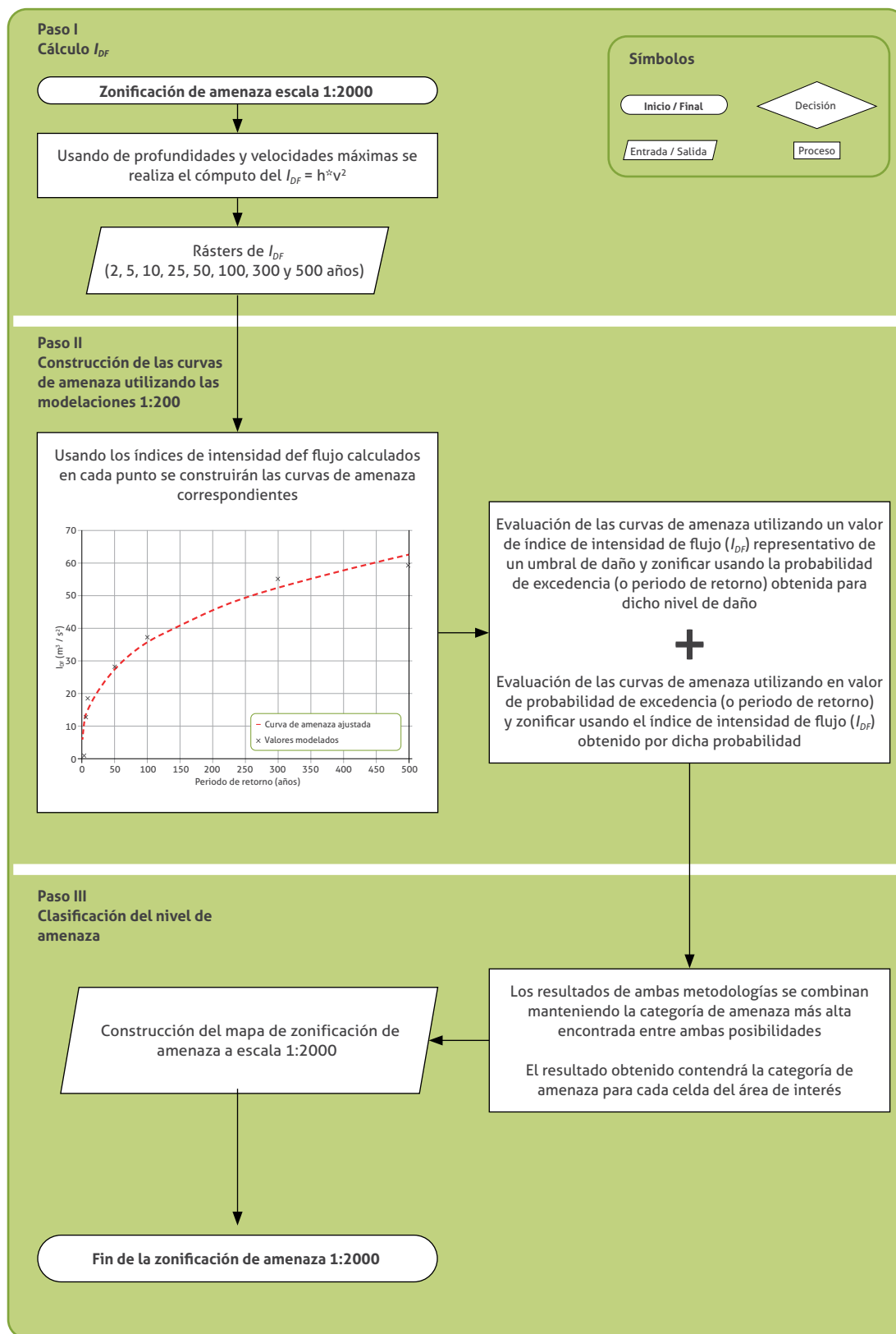
Partiendo de las precisiones anteriores, este capítulo aborda los insumos requeridos para el desarrollo de esta etapa, considerando que los modelos de transporte propuestos a escala

1:2000 contienen una base física más robusta, son construidos con mejor información base y representan mejor una cierta gama de procesos físicos relevantes en el caso de avenidas torrenciales. Con base en los insumos descritos, se expone la construcción de las curvas de amenaza, se discute sobre los criterios usados para la zonificación y, finalmente, se indican los productos esperados de la evaluación de amenaza.

6.3.1. Fuentes de información e insumos para la cuantificación de amenaza a escala 1:2000

La discusión sobre las variables utilizadas para caracterizar la amenaza que se presenta en la sección 5.3.1. es completamente válida para sustentar la elección de la variable que se usa en este capítulo para la construcción de las curvas de amenaza. Sin embargo, algunos aspectos adicionales marcan diferencias importantes sobre el tipo de evaluación posible en ambas etapas.

Las diferencias en la calidad de la información y los modelos numéricos hacen que la estimación del índice de intensidad de flujo (I_{DF}), realizada durante la etapa de transporte, arrastre y depósito, sea mucho más confiable y, por ende, apta para ser interpretada de forma cuantitativa, y dado que puede asociarse directamente al nivel de daño generado (Jakob *et al.*, 2012), permite evidenciar la posibilidad concreta de pasar de amenaza a evaluación de riesgo. Asimismo, como cada escenario puede asociarse a la temporalidad de los deslizamientos y el material se incorpora al movimiento a medida que el flujo se desarrolla, aspectos que no es posible contemplar en los modelos utilizados en la escala 1:25 000 y que mejoran las estimaciones realizadas a escala 1:2000. Finalmente, los aspectos reológicos y de comportamiento (incluso incluyendo múltiples fases) reducen la necesidad de contar con variables adicionales para representar adecuadamente el impacto y que además son difíciles o imposibles de asociar a un valor de probabilidad, lo cual permite aumentar la confiabilidad, logrando así que la evaluación se realice enteramente en función del I_{DF} .



» **Figura 43.** Procedimiento para la zonificación de amenaza cuantitativa de avenidas torrenciales

6.3.1.1. Productos de la modelación fluidodinámica a escala 1:2000 utilizados en la cuantificación de amenaza

Como ya se mencionó, el insumo fundamental para la evaluación en esta etapa son las velocidades y las profundidades máximas en *cada punto* del espacio (en las celdas o nodos del modelo) para cada uno de los periodos de retorno (que son el inverso de la probabilidad de excedencia anual). Estos insumos permitirán calcular un índice de intensidad de flujo I_{DF} con mayor exactitud, que caracteriza mejor la temporalidad, la intensidad y la magnitud del evento asociada a los periodos de retorno que el calculado a escala 1:25 000.

En resumen, cada celda tendrá múltiples valores de I_{DF} , cada uno de los cuales está asociado a una determinada probabilidad de excedencia anual. A continuación, se describe brevemente el proceso de cálculo del índice de intensidad de flujo y se ilustra la construcción de las curvas de amenaza.

6.3.2. Procedimiento para la cuantificación de amenaza a escala 1:2000

6.3.2.1. Cálculo del índice de intensidad de flujo

En el cálculo del índice de intensidad de flujo (I_{DF}) se realiza de la misma manera que en la escala 1:25 000, con las siguientes diferencias notables:

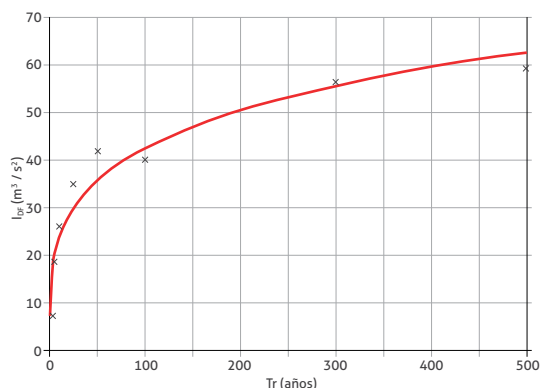
- » A escala 1:25 000 se requiere un solo valor de I_{DF} para realizar la evaluación, el cual se obtiene después de aplicar una estrategia de reducción propuesto. En la escala 1:2000 cada uno de los valores es plasmado como un punto en la curva de amenaza, como se muestra en la siguiente sección.
- » Aunque a primera vista puedan parecer iguales, dado que el proceso de cálculo es el mismo, la calidad de los insumos y los modelos son superiores en escala 1:2000, lo que implica una mayor calidad de los resultados, permitiendo un análisis cuantitativo que no requiere variables adicionales porque re-

presenta mucho mejor la física en las simulaciones. Un ejemplo claro de lo anterior es la temporalidad en la que ocurren los aportes de los deslizamientos, que no es posible considerar en los modelos 1:25 000, pero sí puede ser considerada en esta etapa, por lo que deslizamientos que se generan en diferentes momentos en el tiempo son representados de forma adecuada (y no simplemente distribuidos con la tendencia del hidrograma). Además, la espacialidad de dichos aportes también es considerada de mejor manera, pues es posible ingresar directamente con los deslizamientos a los modelos numéricos, mientras que muchos de los modelos usados a escala 1:25 000 solo permitirían ingresar hidrógrafas en las cuales ya se debió distribuir el material sólido con la misma tendencia del hidrograma.

- » La temporalidad aludida en el punto anterior abre la posibilidad de simular diferentes eventos individuales, lo cual vuelve la evaluación más flexible, menos conservadora y mejor adaptada a las necesidades de esta etapa detallada, por cuanto representa mejor los eventos esperados y permite la obtención de I_{DF} más adecuados.

6.3.2.2. Distribución espacial de curvas de probabilidad de excedencia del índice de intensidad de flujo (curvas de amenaza)

Con los valores de índice de intensidad de flujo (I_{DF}) asociados a periodos de retorno —y, por ende, asociados a probabilidad de excedencia anual— en cada una de las celdas se tendrá información suficiente para realizar curvas de amenaza para la mayoría de las celdas. Las curvas de amenaza relacionarán el índice de intensidad de flujo contra la probabilidad de ocurrencia de un evento con determinada magnitud o mayor. Una ilustración de la posible curva de amenaza obtenida se muestra en la figura 44. Las curvas de amenaza serán diferentes para cada punto del espacio (representado por celdas en el modelo numérico) e, incluso, podrán tener diferente cantidad de puntos bajo ciertas circunstancias, pues puede ocurrir que un evento con cierta probabilidad de excedencia no llegue hasta determinado



» **Figura 44.** Curva de amenaza, que relaciona la magnitud del evento representada mediante el índice de intensidad de flujo con la probabilidad de excedencia (representada con el periodo de retorno)

punto del espacio (p. ej., un punto que podría verse afectado con el evento con periodo de retorno de 100 años no se afecta con un evento con periodo de retorno de 5 años).

Siempre que se considere necesario, deben plantearse escenarios adicionales a los establecidos mediante los periodos de retorno mencionados en la sección 4.4.1., que permitan construir la curva de amenaza para todos los puntos de interés de forma adecuada (p. ej., con suficientes puntos para que la forma de la curva no se vea afectada por la cantidad de información usada al momento de su construcción). Adicionalmente, debe considerarse que cuando durante el análisis de un periodo de retorno determinado se supera una magnitud que resulte en un escenario de completa destrucción o toda la región de interés se considera en amenaza alta, entonces no debe realizarse escenarios con periodos de retorno mayores, sino que estos deben ser reemplazados por periodos de retorno que se estime sean útiles para una mejor construcción de las curvas de amenaza. De la misma forma, si el periodo de retorno más pequeño de la lluvia no es suficiente para generar un evento que genere algún tipo de afectación en el área de estudio, este punto debe reemplazarse por un periodo de retorno que resulte más útil para la construcción de las curvas de amenaza.

Un aspecto final sobre la construcción de las curvas de amenaza que debe tenerse presente es

que en ningún caso deben usarse menos de seis puntos (lo que implica seis escenarios con eventos que alcanzan dicho punto) para caracterizar una curva de amenaza de un punto cualquiera, especialmente si se pretende pasar en un futuro al análisis de riesgo. Si un punto cualquiera solo se alcanza con los eventos de mayor magnitud, debe considerarse a la luz la metodología de zonificación presentada adelante como una región de amenaza baja, pues la probabilidad de que ocurra un evento peligroso con los criterios mostrados adelante es baja.

Nótese que los análisis realizados con las curvas de amenaza ya construidas no tienen por qué limitarse a la zonificación presentada, que el mínimo análisis requerido, sino que existe la posibilidad de realizar otro tipo de análisis a partir de ellas, de acuerdo con las necesidades del municipio (p. ej., calcular la probabilidad de que se exceda cierto valor del índice de intensidad para una subregión de interés, causando daños sobre infraestructura que se considera de alta disponibilidad o la generación de mapas adicionales).

6.3.2.3. Evaluación de las curvas entrando con una probabilidad de excedencia (o periodo de retorno) asociada a un índice de confiabilidad para un tiempo de exposición

Este enfoque requiere la toma de decisiones referentes al periodo de exposición y el índice de confiabilidad deseado. Para un coeficiente de confiabilidad β determinado, es posible obtener las probabilidades de excedencia anual para todas las distribuciones de probabilidad, lo cual se muestra en la figura 45 y en la tabla 21. Al interpretar estas últimas, nótese que: COV = coeficiente de variación.

En la mayoría de los casos, se considera que un índice de confiabilidad entre 2,5 y 3,0 es adecuado, pues conlleva a una probabilidad de excedencia del evento relativamente baja, por lo que se decidió seleccionar un valor de probabilidad de 0,0025 (relacionado con un periodo de retorno equivalente a 400 años). Partiendo de un análisis de este tipo para evaluar las curvas de amenaza, se obtiene un valor de índice de intensidad de flujo (I_{DP}) asociado a la evaluación de la curva de amenaza de cada punto.



Quebrada Surcabásiga
Guacamayas, Boyacá, 2020
Fotografía de Andrés Reyes

» **Tabla 21.** Probabilidad de falla (excedencia anual) relacionada con el índice de confiabilidad para diferentes distribuciones de probabilidad

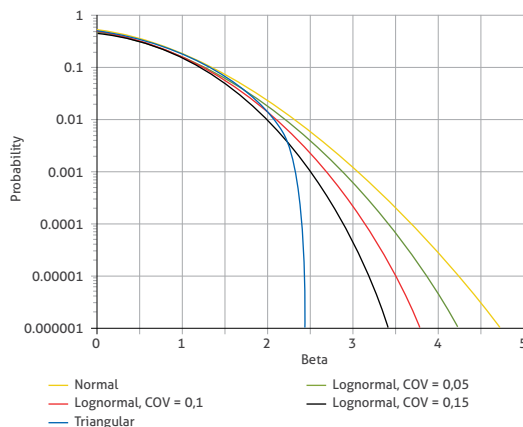
Índice de confiabilidad	Probabilidad de excedencia				
	Distribución normal	Distribución triangular	Distribución LogNormal		
			COV 0,05	COV 0,10	COV 0,15
0,0	$5,000 \times 10^{-1}$	$5,000 \times 10^{-1}$	$5,000 \times 10^{-1}$	$5,199 \times 10^{-1}$	$5,297 \times 10^{-1}$
	$3,085 \times 10^{-1}$	$3,167 \times 10^{-1}$	$3,150 \times 10^{-1}$	$3,312 \times 10^{-1}$	$3,271 \times 10^{-1}$
0	$1,586 \times 10^{-1}$	$1,751 \times 10^{-1}$	$1,583 \times 10^{-1}$	$1,571 \times 10^{-1}$	$1,551 \times 10^{-1}$
1,5	$6,681 \times 10^{-2}$	$7,513 \times 10^{-2}$	$6,236 \times 10^{-2}$	$5,713 \times 10^{-2}$	$5,111 \times 10^{-2}$
2,0	$2,275 \times 10^{-2}$	$1,684 \times 10^{-2}$	$1,860 \times 10^{-2}$	$1,437 \times 10^{-2}$	$1,026 \times 10^{-2}$
2,5	$6,210 \times 10^{-3}$	0,0	$4,057 \times 10^{-3}$	$2,298 \times 10^{-3}$	$1,048 \times 10^{-3}$
3,0	$1,350 \times 10^{-3}$	0,0	$6,426 \times 10^{-4}$	$2,111 \times 10^{-4}$	$4,190 \times 10^{-4}$
3,5	$2,326 \times 10^{-4}$	0,0	$6,542 \times 10^{-5}$	$9,831 \times 10^{-6}$	$4,415 \times 10^{-7}$
4,0	$3,167 \times 10^{-5}$	0,0	$4,484 \times 10^{-6}$	$1,997 \times 10^{-7}$	$6,469 \times 10^{-10}$
4,5	$3,398 \times 10^{-6}$	0,0	$1,927 \times 10^{-7}$	$1,396 \times 10^{-9}$	$4,319 \times 10^{-14}$
5,0	$2,867 \times 10^{-7}$	0,0	$4,955 \times 10^{-9}$	$2,621 \times 10^{-12}$	

Fuente: adaptado de Baecher y Christian (2003).

A continuación, se describirán puntualmente los criterios propuestos para realizar la categorización de la amenaza en alta, media y baja, los cuales finalmente son usados para realizar la zonificación del área de estudio. Aunque la clasificación está basada en la amenaza, los aspectos asociados al potencial de daño fueron considerados.

Los criterios para la zonificación de amenaza se comenzaron a delinear mencionando como el nivel de daño de un evento particular (asociado a un índice de confiabilidad) puede utilizarse para establecer categorías, en este caso, de amenaza. La idea fue aplicada usando la información presentada por Jakob *et al.* (2012) que relaciona rangos del índice de intensidad de flujo con probabilidades de observar un cierto nivel de daño, la categorización propuesta fue determinada con los siguientes criterios:

- » Si en un lugar determinado el I_{DF} no alcanza los $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$, implica que hay baja probabilidad de que se genere daño estructural, por lo que ese lugar se categoriza como amenaza baja.
- » Si en un lugar determinado el I_{DF} es mayor o igual a $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$, pero menor a $50 \text{ m}^3/\text{s}^2$, indican que la probabilidad de que se genere colapso leve es considerable, pero la probabilidad de daño estructural leve es baja, entonces se clasificará dicho punto como amenaza media.
- » Si en un lugar determinado el I_{DF} iguala o excede los $50 \text{ m}^3/\text{s}^2$ la probabilidad de colapso es significativa y dicho punto se categoriza como amenaza alta.



» **Figura 45.** Gráfica de índice de confiabilidad (Beta) vs. probabilidad de excedencia (o de falla) para diferentes distribuciones de probabilidad

Fuente: Baecher y Christian (2003)

Es importante resaltar que la zonificación de amenaza cuantitativa sea adecuada usando solamente el índice de intensidad de flujo para la caracterización de la amenaza, la capacidad e idoneidad de los modelos numéricos para representar adecuadamente los procesos físicos y la complejidad del proceso es fundamental, al igual

» **Tabla 22.** Categorías propuestas de acuerdo con el valor de IDF obtenido de las curvas de amenaza

Rango	Categoría
$50 \geq I_{DF}$	Alta
$1 \geq I_{DF} > 50$	Media
$0 \geq I_{DF} > 1$	Baja

que la calidad de los insumos con los cuales se alimentan dichos modelos, pues de otro modo las meras estimaciones de I_{DF} serían una descripción incompleta y sesgada. Un resumen de la propuesta y la condición asociada a cada categorización en función del I_{DF} se presenta en la tabla 22.

El siguiente paso de la zonificación de amenaza es obtener la categoría para cada una de las celdas y construir mapas que muestren las categorías, haciendo énfasis en la descripción de las características de los eventos posibles asociados a cada categoría. Este mapa indica, con base en una aproximación cuantitativa, el nivel de amenaza de *cada punto* del municipio.

6.3.2.4. Evaluación de las curvas entrando con un valor de índice de intensidad de flujo actuando como umbral

En este enfoque, tras la obtención de las curvas se realizaría una clasificación usando un valor umbral del índice de intensidad de flujo. Basándose en el trabajo de Jakob *et al.* (2012), un valor razonable del índice de intensidad de flujo para dividir umbrales de daño es $5 \text{ m}^3/\text{s}^2$, pues determina el paso entre daño estructural leve y daño estructural considerable.

En este caso, la propuesta de amenaza se realizó considerando los siguientes criterios:

- » Si en un lugar determinado la recurrencia esperada para un valor igual o mayor al umbral definido es de menos de 30 años, entonces ese sitio se categoriza como amenaza alta.
- » Si en un lugar determinado la recurrencia esperada para un valor igual o mayor al umbral definido está entre 30 y 100 años, entonces ese sitio se categoriza como amenaza media.
- » Finalmente, si en un lugar determinado la recurrencia esperada para un valor igual o

» **Tabla 23.** Categorías según el valor de probabilidad obtenido de las curvas de amenaza

Rango	Categoría
$0,43 \geq P > 0,033$ (2,33 años $\leq T < 30$ años)	Alta
$0,033 \geq P > 0,01$ (30 años $\leq T < 100$ años)	Media
$0,01 \geq P > 0,0033$ (100 años $\leq T < 300$ años)	Baja

mayor al umbral definido es mayor o igual a 100 años, entonces ese sitio se categoriza como amenaza baja.

Un resumen de dicho criterio de categorización se presenta en la tabla 23.

6.3.2.5. Agregación de resultados usando los dos criterios de zonificación presentados

Los dos criterios presentados en las secciones 6.3.2.3. y 6.3.2.4. se desarrollaron bajo premisas diferentes, concibiéndose como dos maneras distintas de entender la zonificación de amenaza; sin embargo, se espera que los dos criterios de zonificación resulten en zonificaciones similares. En la práctica, la zonificación que utiliza el criterio propuesto en la sección 6.3.2.3. resulta en una adecuada definición de las zonas en general, pero con alguna tendencia a clasificar zonas de cauce activo como amenaza media; por su parte, el criterio presentado en la sección 6.3.2.4. resulta en una definición general de las zonas adecuada, pero con alguna tendencia a subrepresentar las transiciones de amenaza media a amenaza alta.

Considerando las tendencias mencionadas, la zonificación debe realizarse utilizando ambos

» **Tabla 24.** Agregación de resultados con los diferentes criterios a escala 1:2000

Clasificación criterio 1 (sección 6.3.2.3)	Clasificación criterio 2 (sección 6.3.2.4)	Clasificación final de amenaza
Alta	Alta	Alta
Alta	Media	Alta
Alta	Baja	Alta
Media	Alta	Alta
Media	Media	Media
Media	Baja	Media
Baja	Alta	Alta
Baja	Media	Media
Baja	Baja	Baja

criterios y agregarse posteriormente, quedándose con la mayor categoría de amenaza obtenida en cada píxel, como se presenta en la tabla 24. La agregación de los dos criterios resulta en una zonificación consistente, obtenida de criterios cuantitativos y con una interpretación clara de cada categoría de amenaza.

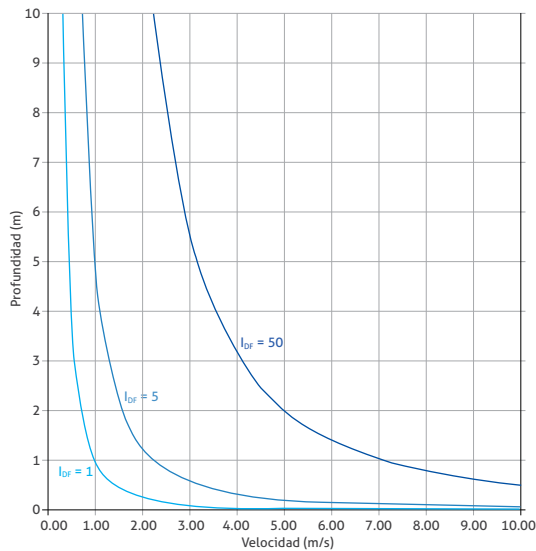
La interpretación se resume en la tabla 25, en la que se presenta la correspondencia entre categorías y los criterios descritos con anterioridad. La interpretación mostrada es la base para la gene-

ración de la leyenda de amenaza a escala 1:2000, pero es necesario considerar que el cruce con los eventos fluviotorrenciales recientes que se presenta en la siguiente sección del documento y algunas recomendaciones adicionales deben incluirse dentro de la leyenda de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000.

La figura 46 ilustra las posibles combinaciones de profundidad y velocidad requeridas para obtener un cierto índice de intensidad de flujo (representado como isolíneas). Esta gráfica permite

» **Tabla 25.** Interpretación general (ejemplo) de las categorías de amenaza para la escala 1:2000, caso piloto Guacamayas, Boyacá

Categoría	Descripción de la categoría
Alta Flujo - Avenidas torrenciales	Zonas que ocupan el 5,96% (11,83 ha) del área de estudio, asociadas principalmente a geoformas indicativas de depósito como cauce actual, terrazas de tipo fluviotorrencial, fluviotorrencial colgada, fluviotorrencial reciente, terraza de acumulación baja, abanico fluviotorrencial reciente, subreciente y antiguo; relacionadas con la evolución geomorfológica de las cuencas de las quebradas Surcabásiga y Los Leones. En estas cuencas se observan procesos de erosión intensa de tipo surco, cárcava, erosión lateral y áreas inestables que comprenden reptación superficial sobre laderas adyacentes al tramo de la vía que comunica las veredas La Laguna y Chiviche, que cruza la quebrada Surcabásiga. Igualmente, se puede presentar alguna de las siguientes condiciones: (i) alta probabilidad de presentar eventos de avenidas torrenciales con potencial de causar daños estructurales parciales en las viviendas y otras edificaciones expuestas con un periodo de retorno de menos de 25 años, (ii) alta probabilidad de presentar eventos de avenidas torrenciales con potencial de causar daños estructurales severos o eventualmente destrucción completa en caso de ocurrir un evento con periodo de retorno de 500 años, estas áreas no deben tener elementos expuestos (viviendas, edificaciones rurales, equipamiento público, infraestructura en general, entre otros) debido al poder destructivo y de afectación asociado a los eventos presentados en el pasado. En términos del índice de intensidad de flujo I_{DF} se entiende que, el mayor valor esperado se asocia a una intensidad de evento mayor y correlacionable con el nivel de daño, para este caso el valor esperado es de $50 \text{ m}^3/\text{s}^2$, para eventos asociados a periodos de retorno a 25 años, con rangos predominantes de velocidad entre 4,27 m/s y 9,96 m/s, y alturas de flujo entre 0,31 m y 0,64 m; mientras que para un periodo de retorno de 500 años los valores predominantes de velocidad y alturas de flujo están en los rangos de 8,34 m/s - 11,47 m/s y 2,03 m - 2,88 m, respectivamente. La categoría comprende gran parte de las zonas que han sido afectadas por avenidas torrenciales de tipo flujo de lodo del año 1968 y flujo de detritos de los años 1944 y 2018.
Media Flujo - Avenidas torrenciales	Ocupa el 19,58% (38,86 ha) del área de estudio, comprende principalmente geoformas indicativas de depósito como: terraza de tipo fluviotorrencial reciente, abanico fluviotorrencial reciente, subreciente y antiguo, escarpe de abanico, cono o lóbulo de flujo de detritos, cono o lóbulo de deslizamiento traslacional; asociadas a la dinámica fluvial y a la evolución geomorfológica de las cuencas de las quebradas Surcabásiga y Los Leones. Presenta procesos erosivos de tipo surco, cárcava, erosión lateral y camino de ganado, mientras que en la zona media de la cuenca de la quebrada Los Leones, en sectores aledaños a la vía San Mateo-Guacamayas, se presenta reptación superficial asociada a inestabilidad y aporte de material al cauce. La categoría está asociada a alguna de las siguientes condiciones: (i) alta probabilidad de avenidas torrenciales con potencial de causar daños parciales en las viviendas y otras edificaciones expuestas, con un periodo de retorno promedio menor a 100 años, (ii) probabilidad de sufrir daños estructurales parciales a severos de los elementos expuestos en caso de ocurrir un evento con periodo de retorno menor a 500 años. En términos del índice de intensidad de flujo I_{DF} se entiende que, el mayor valor esperado se asocia a una intensidad de evento mayor y correlacionable con el nivel de daño, para este caso el valor esperado es de $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$ a $50 \text{ m}^3/\text{s}^2$, que corresponde a rangos predominantes de velocidad entre 0 m/s y 0,5 m/s, y alturas entre 0,08 m a 0,31 m para eventos asociados a un periodo de retorno de 25 años; mientras que para un periodo de retorno de 500 años los valores predominantes de velocidad y alturas de flujo están en los rangos de 2,71 m/s a 4,17 m/s y entre 0,15 m y 0,62 m, respectivamente. Estas zonas coinciden en gran parte con las áreas de afectación del flujo de lodos de 1968, dejada hacia el noroccidente del canal artificial (jarillón) y desde la calle 3 con carrera 2 hacia aguas abajo de la quebrada Surcabásiga.
Baja Flujo - Avenidas torrenciales	Áreas que ocupan el 74,46% (147,82 ha), comprenden zonas que eventualmente pueden presentar avenidas torrenciales con potencial de causar daños en las viviendas y otras edificaciones expuestas, con una recurrencia promedio superior a 100 años, probablemente puede ocurrir alguna sedimentación, o incluso daños estructurales leves, en las viviendas y edificaciones expuestas en caso de que ocurra un evento con un periodo de retorno promedio de 500 años. El valor del índice de intensidad de flujo esperado para este evento es generalmente inferior a $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$ y comprende rangos predominantes de velocidad entre 0 m/s y 0,5 m/s, y alturas predominantes de flujo entre 0 m y 0,08 m para un periodo de retorno de 25 años; mientras que para un periodo de retorno de 500 años los valores predominantes de velocidad y alturas de flujo están en los rangos de 1,52 m/s a 2,71 m/s y 0 m a 0,15 m, respectivamente. Esta categoría de amenaza coincide en menor proporción con algunas de las zonas de afectación del flujo de lodos de 1968, dejada hacia el noroccidente del canal artificial (jarillón) construido sobre las márgenes de la quebrada Surcabásiga y parte del casco urbano.



» **Figura 46.** Isolíneas de índice de intensidad de flujo (I_{DIF}) mostrando así su relación con las velocidades y profundidades del flujo

interpretar de manera más intuitiva los valores de índice de intensidad presentados en la leyenda de amenaza, y es posible observar que un mismo valor de índice de intensidad puede estar relacionado con diferentes valores de profundidad y velocidad.

En resumen, las categorías de amenaza deben incluir la descripción geomorfológica de los depósitos (geomorfos indicativas), rasgos geomorfológicos, rangos de velocidad y altura, porcentaje de la categoría respecto del área de estudio, rango de valores del índice de intensidad del flujo, posibles daños y coincidencia con manchas de eventos recientes (<500 años), estos descriptores son particulares en cada caso de estudio.

Finalmente, la leyenda debe ir acompañada de las recomendaciones que surjan por cada nivel de amenaza según el criterio y el conocimiento experto.

6.3.3. Productos de la cuantificación de amenaza a escala 1:2000

El producto principal de esta etapa de análisis es una capa con las categorías de amenaza, en la que permitan dar una idea general de las características de los flujos que potencialmen-

te afectarían una región determinada. Luego, la zonificación obtenida será comparada con la zonificación geomorfológica mediante una matriz de confusión, momento en el cual la cartografía generada para el nivel de amenaza estará sujeta a ajustes procedentes de dicho análisis y la validación según el criterio experto.

6.4. Integración de la cartografía de los eventos fluviotorrenciales y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000

El objetivo de hacer la integración de los eventos identificados en el área de estudio mediante el inventario de avenidas torrenciales y el trabajo de campo con la amenaza cuantificada es validar que efectivamente la zonificación de amenaza abarque los flujos recientes (<500 años).

6.4.1. Fuentes de información e insumos para la integración de la cartografía de los eventos y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000

Para llevar a cabo esta integración se requiere:

- » La representación cartográfica de los eventos que conforman el inventario de avenidas torrenciales históricas (sección 3.2.1.1.).
- » La cartografía de los eventos encontrados en la geomorfo indicativa más reciente (sección 3.2.2.).
- » La zonificación de amenaza a escala 1:2000 (sección 6.3.).

6.4.2. Procedimiento para la integración de la cartografía de eventos y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000

La cartografía de los eventos realizada a partir del inventario de avenidas torrenciales y de la caracterización de los eventos recientes comúnmente presentes en la geomorfo indicativa de depósito más reciente (capítulo 3) (p. ej., abanico fluviotorrencial reciente o actual), debe ser superpuesta sobre la zonificación cuantitativa de amenaza 1:2000. Esto con el fin de corroborar si la zonificación de

amenaza incluye los depósitos de los eventos fluvio-torrenciales recientes (<500 años). Para ello se recomienda rasterizar la cartografía de los eventos y verificar que cada pixel tenga un nivel de amenaza asignado, en caso contrario esos pixeles serían considerados falsos negativos. Para asignarle un valor de amenaza a esos falsos negativos se recomienda adoptar la clasificación propuesta por (Jakob y Hungr, 2005) en la que clasifica los flujos de detritos y flujos de origen volcánico según su magnitud. De las diez categorías propuestas por (Jakob y Hungr, 2005), las últimas cinco no aplican para el tipo de flujos evaluados por esta guía metodológica, ya que son exclusivamente de origen volcánico. De esta manera se propone agrupar las cinco clases restantes en las categorías baja, media y alta, las cuales clasifican los eventos según su magnitud (tabla 26). Los campos que describen las magnitudes de flujos volcánicos en el trabajo de Jakob y Hungr (2005), se definen como flujos con altos contenidos de sedimentos finos que pueden

incluir flujos tipo *muddy debris flow*, que en esta metodología son adoptados como flujos de lodos. Asimismo, se considera que los rangos de los flujos de lodos pueden aplicar de alguna u otra manera a los flujos hiperconcentrados, teniendo en cuenta que el pico de descarga de un flujo de detritos es hasta 20 veces mayor que el de un flujo hiperconcentrado (Ouellet y Germain, 2014; Wilford *et al.*, 2004).

6.4.3. Productos de la integración de la cartografía de eventos y la cuantificación de la amenaza a escala 1:2000

El producto resultante de la integración entre la zonificación de amenaza cuantitativa a escala 1:2000 y el complemento de las zonas con falsos negativos, que fueron categorizados según la magnitud de los eventos que les dieron origen. Este producto debe ser generado en formato *raster*.

» **Tabla 26.** Clasificación de eventos según su magnitud

Magnitud	Volumen (m ³)	Descarga pico en flujos de detritos (m ³ /s)	Descarga pico en flujos de lodos (m ³ /s)	Área en flujos de detritos (m ²)	Área en flujos de lodos (m ²)
Baja	< 10 ²	< 30	< 3	< 2 × 10 ³	< 2 × 10 ⁴
Media	10 ³ -10 ⁴	30-200	3-30	2 × 10 ³ -9 × 10 ³	2 × 10 ⁴ -9 × 10 ⁴
Alta	10 ⁴ -10 ⁶	200-12.000	30-3 × 10 ³	9 × 10 ³ -2 × 10 ⁵	9 × 10 ⁴ -2 × 10 ⁵

Fuente: tomado y modificado de Jakob y Hungr (2005).



» Avenida torrencial de 2017
Quebrada Taruca
Mocca, Putumayo
Fotografía de Andrés Reyes



7

Análisis de otros escenarios



Quebrada Vendigano
Vereda Llano Largo, 2019
El Espino, Boyacá
Fotografía de Andrés Reyes

La presente guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales se concentra en las etapas de iniciación, transporte y depósito de los siguientes movimientos de masa de tipo flujo: flujo de lodos, flujo de detritos, flujos hiperconcentrados, deslizamientos de sedimentos no consolidados, represamientos de detritos leñosos, avalanchas de detritos o deslizamientos complejos. Sin embargo, hay escenarios adicionales a las etapas mencionadas que podrían cambiar significativamente el poder erosivo del flujo, su concentración volumétrica, picos de descarga y su trayectoria y consecuentemente la zonificación de la amenaza. El objetivo del presente capítulo es describir las características de estos escenarios de represamiento y ruptura (avulsión) de diques con el propósito de ser incluidos en la simulación de un evento fluviotorrencial.

La ocurrencia de estos escenarios se presenta frecuentemente en el drenaje principal de la unidad de modelación. Los escenarios que pueden cambiar significativamente la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales, en caso de que se presenten, son:

- » Obstrucción del cauce por un movimiento de masa perpendicular al flujo (p. ej., deslizamientos, caída de rocas).
- » Represamiento causado por el depósito de material producto de la avenida torrencial, que resulte en la obstrucción del flujo (p. ej., detritos leñosos).
- » Rompimiento de diques o de jarillones (avulsión) que se hayan formado naturalmente (p. ej., canales de avulsión) o antrópicamente a lo largo del cauce, como protección lateral (p. ej., bancas de los cauces) y que, en un evento extremo, sean desbordados y erodados por

un flujo que exceda la capacidad de confinamiento y cambie de dirección.

Frente a evidencias que favorezcan la ocurrencia de alguno de los tres escenarios anteriormente mencionados, el consultor deberá realizar la modelación del escenario que corresponda o de los que según su criterio experto se deban evaluar (con intervenciones antrópicas o sin ellas), usando la misma variable de evaluación de amenaza descrita en la metodología (p. ej., índice de intensidad de flujo) y deberá realizar los ajustes necesarios para la modelación del transporte y depósito de material. En el caso de rompimientos de diques o jarillones naturales o antrópicos, también conocidos como *procesos de avulsiones*, se debe tener en cuenta que dicha estructura está cumpliendo la función de redireccionar el flujo del cauce y estará expuesta a las fluctuaciones del nivel del cauce, la erosión de sus laderas por el flujo en sí mismo, y al impacto de detritos en la ocurrencia de una avenida torrencial (Nasmith y Mercer, 1979). Para el rompimiento de diques es importante considerar la fuerza de impacto del flujo torrencial que, según Armanini (1997), está relacionada con el frente de velocidad y no con la altura del dique.

7.1. Escenario de represamiento por detritos leñosos (DL)

La implementación del escenario propuesto de detritos leñosos (DL) implica analizar y verificar *a priori* la presencia alta y media de densidad de vegetación (poca presencia de cobertura vegetal) en la zona de estudio. Además de evidenciar en campo los DL en represamiento o transportados por eventos torrenciales.

Para este análisis se tiene en cuenta la tabla 27, en la que se categorizan las unidades de cobertura de la tierra que forman parte de la leyenda utilizada en los proyectos de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25 000, con relación al posible aporte de material leñoso al canal del río, en el cual, 1 significa un nivel de priorización baja o poco significativa para implementar la metodología de detritos leñosos (DL) y 2-3 representa una priorización media y alta donde se deberá implementar esta evaluación por DL. Por ejemplo, a partir del área total de la zona de estudio, se determina la relación porcentual por cada grupo de coberturas de la tabla 27 y se determina la categoría de priorización respectiva, la cual define la aplicación del escenario de represamiento.

De otra parte, en la salida de reconocimiento del proyecto, se apoya y complementa con la observación, la identificación de focos de represamientos a lo largo del canal de río donde predominan detritos leñosos con longitudes promedio mayores a 1 m.

» Importancia

Las acumulaciones de DL afectan el comportamiento hidráulico de las avenidas torrenciales, convirtiéndose en una fuente adicional de resistencia en presamientos que se pueden dar tanto en ríos de baja pendiente como en ríos de montaña (Marriott *et al.*, 1996).

Los detritos leñosos provienen de tres procesos diferentes: (1) movimientos en masa, (p. ej.,

deslizamientos, caídas de roca, flujos de detritos); (2) arrastre de material en afluentes de pendiente pronunciada, y (3) erosión de bancas y terrazas aluviales. Para cuencas pequeñas de alta pendiente se reportan mayores contribuciones de leños provenientes de deslizamientos, mientras que, para cuencas de pendientes bajas, los detritos provienen principalmente de la erosión de las bancas (Piton y Recking, 2016).

En general, dentro de los factores a tener en cuenta se pueden mencionar la cantidad y tipo de material leñoso aportado a una corriente hídrica, la localización del material leñoso, tamaño de los leños, dinámica de aporte, el transporte y el tiempo de residencia de los leños en el cauce (Iroumé *et al.*, 2015). Sin embargo, el transporte y el tiempo de residencia no se tendrán en cuenta para el desarrollo de esta metodología.

Por otra parte, se deben considerar las fuentes de incorporación de material leñoso a una corriente hídrica que incluyen causas antropogénicas y climáticas como: vientos fuertes, incendios forestales, avenidas máximas o residuos de actividades antrópicas y de beneficio de la madera (Ulloa *et al.*, 2010).

En resumen, la cantidad y tipo de material leñoso existente en el cauce depende de las características del bosque que lo alimenta, su disposición y comportamiento hidrológico de la cuenca (Ulloa *et al.*, 2010). La madera se libera de las zonas de vegetación ubicadas en los tramos superiores de los cauces, y luego, se redistribuyen y depositan en tramos aguas abajo (Gomi *et al.*, 2001).

» **Tabla 27.** Priorización por aporte de detritos leñosos (DL)

Coberturas	Priorización por aporte de detritos leñosos (DL)	Categoría de priorización
Territorios artificializados, cultivos transitorios, cultivos permanentes, pastos, mosaico de cultivos, mosaico de pastos y cultivos, herbazal, zonas arenosas naturales, afloramientos rocosos, tierras desnudas y degradadas, zonas quemadas, áreas húmedas continentales, aguas continentales.	1 (≤ 40 % área total)	Baja
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mosaico de pastos con espacios naturales, mosaico de cultivos con espacios naturales, arbustal.	2 (<> 40 % área total)	Media
Bosque denso alto de tierra firme, bosque denso alto inundable, bosque denso alto inundable, bosque denso bajo inundable, bosque abierto alto de tierra firme, bosque abierto alto inundable, bosque abierto bajo de tierra firme, bosque abierto bajo inundable, bosque fragmentado con pastos y cultivos, bosque fragmentado con vegetación secundaria, bosque de galería o ripario, plantación forestal, vegetación secundaria o en transición.	3 (<> 40 % área total)	Alta

Según Ruiz-Villanueva *et al.* (2014), los efectos del cambio de la morfología del cauce durante un evento torrencial y la reducción de la sección transversal del cauce o de las estructuras hidráulicas, por ejemplo, *box culvert* (Piton y Recking, 2016); debido a bloqueos por el transporte significativo de detritos leñosos largos (longitudes mayores a 1 m) pueden incrementar el potencial de inundación.

De acuerdo con lo anterior, la propuesta metodológica está orientada a identificar los volúmenes aproximados en las zonas de aporte de detritos leñosos (DL) y en las zonas de acumulaciones leñosas (AL). Es importante aclarar que, aunque el cálculo del volumen movilizado resulta conveniente para identificar la cobertura de detritos para puntos de potencial represamiento, no está orientado a simular su transporte o dinámica de represamiento, debido a que las herramientas utilizadas en el proceso de transporte, arrastre y depósito de una avenida torrencial (capítulos 5 y 6), no involucran el cambio reológico ni incorporan el transporte ni la translación y rotación de DL, por lo que no será abordado en esta propuesta metodológica.

La estimación de volúmenes de detritos leñosos e identificación de puntos de acumulación y posible represamiento en el cauce comprenden procesos que se dividen en dos grupos (figura 47):

- Zonas de aporte por detritos leñosos, la cual contempla la susceptibilidad por DL y la generación de volúmenes de los DL.
- Zonas de acumulación y posible represamiento por detritos leñosos (DL).

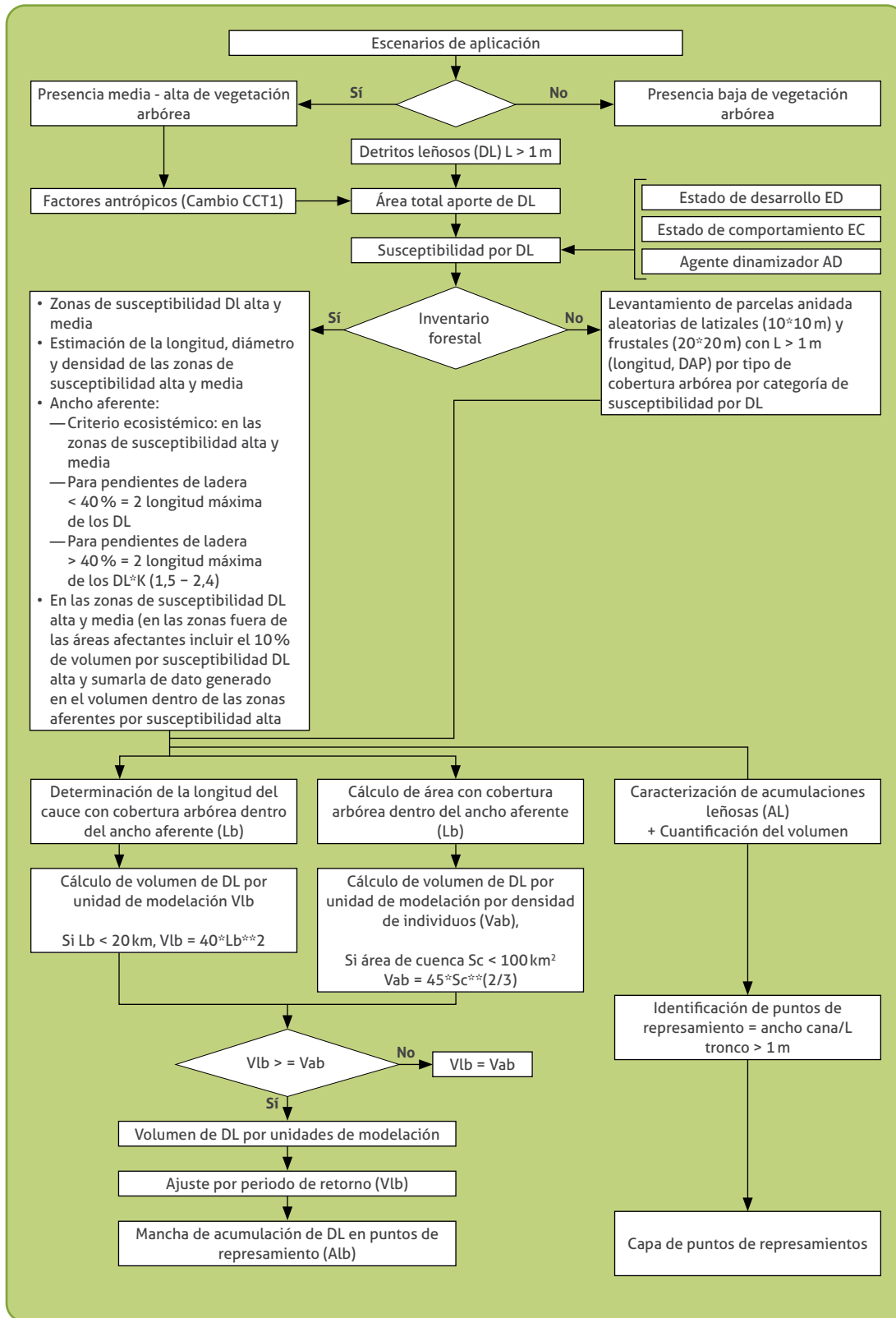
A continuación, se describen las etapas generales que componen la implementación de esta propuesta metodológica.

7.2. Etapas generales de la implementación de la metodología de detritos leñosos (DL)

En el marco del procedimiento para la estimación de volúmenes de detritos leñosos e identificación de puntos de represamiento (figura 47) se

describen unas etapas generales que facilitan la comprensión de las actividades:

- » *Etapas 1: Evaluar la implementación de la metodología de DL.* Tabla 27 y salida de reconocimiento de la zona de estudio.
- » *Etapas 2: Relacionar espacialmente las unidades de cambio generadas en el multitemporal descritas en la tabla 29 con la zona de estudio.* La información del multitemporal se obtiene de los estudios de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000 con el fin de puntualizar la zona potencial de análisis de la susceptibilidad de aporte por detritos leñosos. Este procedimiento consiste en exportar las unidades de cambio que se encuentran mencionadas en la tabla 29 y cortarlas con la cuenca de estudio.
- » *Etapas 3: Realizar la evaluación de la susceptibilidad de aporte de material leñoso (DL).* Se describe en la sección 7.1.3.1. de este documento. Esta actividad se realiza en oficina y se utilizan los siguientes insumos cartográficos (tabla 28) para generar las respectivas evaluaciones de cada uno de los atributos descritos en la tabla 30.
- » *Etapas 4: Trabajo de campo.* A partir de lo anterior, se procede a realizar la campaña de campo donde se deberá hacer el levantamiento de las acumulaciones leñosas a lo largo del canal del río y llanura de inundación (formato de campo anexo 5), puntualizar las zonas de represamiento por DL y analizar la dinámica de los DL con el río. Si no se cuenta con inventario forestal, se deberá realizar un levantamiento de parcelas anidada aleatoria de latizales y fustales con longitud mayor a 1 m por tipo de cobertura arbórea por categoría de susceptibilidad por DL.
- » *Etapas 5: Definir la zona o ancho aferente de la cuenca.* Teniendo en cuenta la altura máxima de los individuos arbóreos a lado y lado del canal del río, y la relación con la pendiente como se describe en la tabla 26. Esto con el fin de reducir el área de incidencia de los aportes de detritos leñosos (DL) o su área de influencia directa. Antes de ir a campo se recomienda generar un ancho aferente inicial, y ya en campo, se realiza el respectivo ajuste



» **Figura 47.** Procedimiento para la estimación de volúmenes de detritos leñosos e identificación de puntos de represamiento

en función de lo observado. Para determinar este dato se tendrá en cuenta la cobertura identificada, las alturas promedio descritas en la leyenda nacional y el apoyo de la campaña de campo para visualizar los árboles de mayor altura por grupo de cobertura y llegar a un promedio respectivamente. En campo, se recomienda aprovechar los puntos donde se describan las acumulaciones leñosas y tomar información relacionada con la puntualización del ancho aferente.

» *Etapa 6: Cálculo del volumen por DL.* Esta etapa se desarrolla en oficina. El volumen de los DL = $V1 + V2 + V3$, donde V1 es el volumen de DL en las zonas de susceptibilidad alta y media ubicada en el ancho aferente, como se describe en la figura 47 y sección 7.1.3.2.; V2 es el volumen de DL de las acumulaciones leñosas identificadas en el formato de campo, anexo 5; y V3 es el 10 % del volumen por susceptibilidad alta fuera del área del ancho aferente, categoría generada en la etapa 3.

» **Tabla 28.** Atributos de la susceptibilidad por DL e insumos cartográficos

Atributos de la susceptibilidad por DL	insumo cartográfico
Curva de desarrollo de la vegetación + Curva hipsométrica (CH) Integral hipsométrica (IH) (CIH).	DEM, curva hipsométrica de la cuenca.
Orden de suelo (T)	Estudio de suelos escala 100k y 25k en formato análogo y digital, apoyo temático de suelos edafológicos del estudio de amenaza por movimientos en masa, escala 100k en formato análogo y digital.
Altura promedio de la vegetación (HV)	Documento: criterios de clasificación de los bosques en coberturas de la tierra (Posada <i>et al.</i> , 2010)
Profundidad radicular (PR)	Estudio de suelos escala 100k y 25k en formato análogo y digital, apoyo temático de cobertura de la tierra y suelos edafológicos del estudio de amenaza por movimientos en masa, escala 100k en formato análogo y digital.
Carga de la cobertura (CC)	Capa de cobertura de la tierra del tiempo actual escala 25k, número de estratos verticales de la cobertura.
Densidad de la cobertura (DC)	Capa de cobertura de la tierra del tiempo actual escala 25k, leyenda Corinne Lan Cover 100k por cada una de las coberturas arbóreas relacionadas (Posada <i>et al.</i> , 2010).
Precipitación P	Mapa de precipitación, curvas intensidad/duración/frecuencia (valores en mm/h) generadas en el proyecto.
Viento V	Datos de velocidad del viento mensual multianual (km/h).

» **Tabla 29.** Unidades de cambio que definen el área de susceptibilidad por DL

Tipo de cambio	Comportamiento del cambio
Pérdida (pérdida o reducción del estrato vegetal)	De bosques densos a bosques menos densos o fragmentados o plantación forestal.
	De bosques de galería y/o ripario a pastos o cultivos y/o zonas erosionadas.
	De bosques a arbustales, vegetación secundaria, zonas quemadas.
	De plantación forestal a pastos enmalezados, vegetación secundaria, zonas erosionadas, zonas quemadas.
	De vegetación herbácea con arbustos y/o árboles a herbáceas densas y/o pastos, zonas quemadas, zonas erosionadas.
	De arbustales a pastos y/o cultivos, zonas erosionadas, zonas quemadas.
Ganancia (efecto de la regeneración natural – incremento del estrato vegetal)	De bosques menos densos o fragmentados o plantación forestal a bosques densos
	De pastos o cultivos y/o zonas erosionadas a bosques de galería y/o ripario
	De arbustales, vegetación secundaria, zonas quemadas a bosques.
	De pastos enmalezados, vegetación secundaria, zonas erosionadas, zonas quemadas a plantación forestal.
	De herbáceas densas y/o pastos, zonas quemadas, zonas erosionadas a vegetación herbácea con arbustos y/o árboles.
De pastos y/o cultivos, zonas erosionadas, zonas quemadas a arbustales.	

» **Tabla 30.** Variables y atributos de la susceptibilidad por DL

Variable	Atributo	Relaciones temáticas	Susceptibilidad
Estado de desarrollo (ED)	Curva de desarrollo de la vegetación + Curva hipsométrica (CH)	$ED = 0,40(CIH) + 0,30T + 0,30HV$	SuscdL = $DL = (ED + EC + AD)/3$
	Integral hipsométrica (IH) (CIH)		
	Orden de suelo (T)		
Estado de comportamiento (EC)	Altura promedio de la vegetación (HV)	$EC = 0,30PR + 0,30CC + 0,40 DC$	
	Profundidad radicular (PR)		
	Carga de la cobertura (CC)		
Agente dinamizador (AD)	Densidad de la cobertura (DC)	$AD = 0,50P + 0,50V$	
	Precipitación P		
	Viento V		

Los datos de volumen generados se entregan por unidades de modelación del proyecto, realizando los respectivos cortes con dichas unidades y ajustándolos con los periodos de retorno, como se describe en la sección 5.1.

- » **Etapas 7: Identificación de los puntos de represamiento.** Espacializar cartográficamente los puntos de represamiento identificados en la etapa 4, descritos en el formato de campo, anexo 5, teniendo en cuenta una visual tipo perfil como se presenta en la figura 49.
- » **Etapas 8: Capítulo de detritos leñosos.** Esta actividad está presente a lo largo de la generación de los datos y resultados.

7.2.1. Zonas de aporte por detritos leñosos

Las zonas de aporte por detritos leñosos (DL) generan los elementos leñosos de entrada en mayor o menor grado, en función del volumen de madera hacia el canal del río. La identificación de estas áreas depende del conocimiento de las características físico-bióticas de la vegetación en cuencas de carácter torrencial con el fin de determinar las áreas con mayores posibilidades de aporte de madera al drenaje.

7.2.1.1. Susceptibilidad por detritos leñosos (DL)

Inicialmente se debe definir el área potencial de análisis de la susceptibilidad de aporte por detritos leñosos en la zona de estudio, a partir de la identificación de cambios por cobertura de la tierra (factor antrópico) y uso del suelo que forman parte del estudio de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25 000, cuyas unida-

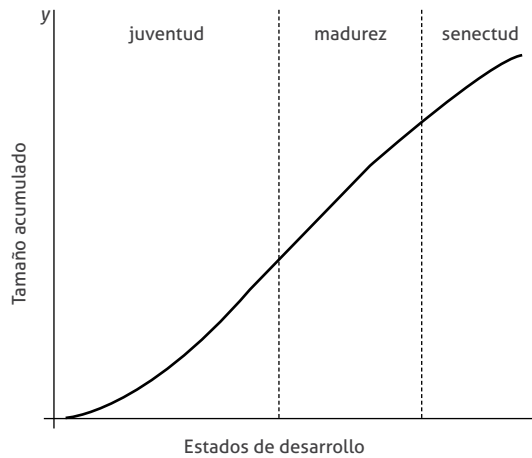
des se relacionan con actividades de pérdida de vegetación o de regeneración. No abarca dinámicas de cambio a nivel agrícola, pecuario y urbano de la tabla 29.

Posteriormente en el área potencial de susceptibilidad (tabla 29) se evalúan una serie de factores o variables que zonificarán el aporte de material leñoso a las corrientes fluviales y que posteriormente influirán en el comportamiento de los flujos de masa tipo avenida torrencial.

La tabla 30 presenta las variables, así como los factores de ponderación que agrupan los estados de desarrollo, el estado de comportamiento y los agentes dinamizadores. Cada atributo se califica con una variable de tipo integral que toma valores ponderados entre 1 y 3 para generar el nivel de susceptibilidad en tres rangos.

El rango del parámetro $SuscDL = (0-0,99)$ corresponde a susceptibilidad baja, $(1-1,99)$ a susceptibilidad media y $(2-3)$ a susceptibilidad alta. A continuación, se definen cada una de las variables y atributos descritos en la tabla 30 necesarios para definir el nivel de susceptibilidad de aporte de detritos leñosos.

- » **Estado de desarrollo (ED).** Hace referencia a las etapas de crecimiento amplias de la vegetación, distribuidas en juventud, madurez y senescencia, las cuales brindan ciertos patrones de comportamiento en función de la adaptación al medio (figura 48). Por ejemplo, un árbol en crecimiento inicial (juventud) es más vulnerable a desprendimientos, afectación por factores externos, entre otros, que un árbol adulto donde las condiciones físico-bióticas tienen mayor desarrollo y adap-



» **Figura 48.** Curva de crecimiento de la vegetación

Fuente: Ramirez (2018).

tabilidad. De igual manera, un árbol en su etapa de senescencia empieza a perder ciertas características de adaptación, es decir la curva de productividad empieza a decrecer (Lema, 1979).

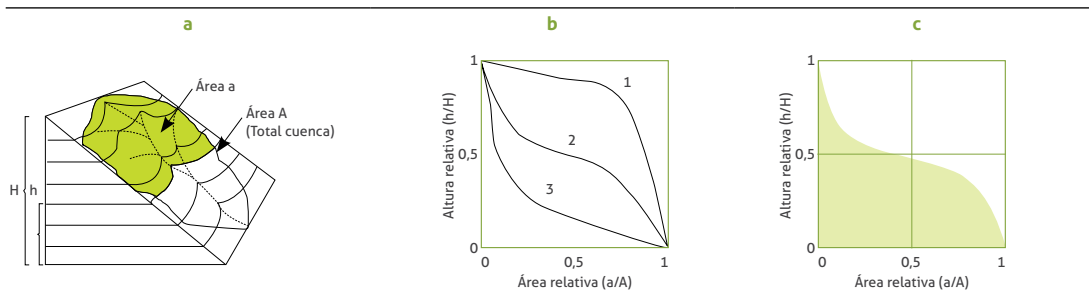
A partir de lo anterior se da una matriz que relaciona el estado de crecimiento de la vegetación con la edad de la cuenca para generar los valores del atributo IH combinado, con el fin de identificar los rangos de mayor o menor susceptibilidad de aporte de DL, como se presenta en la tabla 31. Para esto se incluyen dos índices morfométricos denominados *curva hipsométrica*, los

cuales permiten clasificar la cuenca en una etapa de madurez o juventud, que hace que la vegetación sea más o menos susceptible a estos mecanismos de inestabilidad. Para determinar esta aproximación se tienen en cuenta los siguientes atributos:

» *Curva hipsométrica (CH) e integral hipsométrica (IH)*. Describe la distribución de las elevaciones topográficas a través de un área de terreno en la cuenca. Define la relación entre el área de la superficie, por encima de una elevación dada (tabla 31a). La curva 1 de la tabla 31b define las zonas jóvenes, la curva 2 de la tabla 31b define las zonas maduras, y las zonas viejas son definidas con la curva 3 de la tabla 31c. Los rangos de la curva se definen como se ilustra en la tabla 31.

A partir de lo anterior, el resultado de la curva hipsométrica (CH) e integral hipsométrica (IH) se relaciona con la curva de crecimiento de la vegetación. Si la vegetación está ubicada en áreas jóvenes ($HI > 0,6$), es más susceptible a caídas o pérdida de material por actividades de siembra y regeneración natural. La vegetación ubicada en áreas maduras ($HI = 0,35 - 0,6$) presenta mayor estabilidad, y la vegetación ubicada en cuencas viejas ($HI < 0,35$) se relaciona con vegetación en senectud, la cual es más susceptible a ser aportante de DL, como se relaciona en la tabla 32.

» **Tabla 31.** Rangos de HI



IH (Integral hipsométrica)

IH > 0,6 cuencas con gran potencial erosivo

IH entre 0,35 y 0,6 cuencas en equilibrio

IH < 0,35 cuencas sedimentarias

Fuente: Quezada y Jensen (2010)

» **Tabla 32.** Relación de la curva hipsométrica (CH) e integral hipsométrica (IH) con el estado de crecimiento de la vegetación

Curva hipsométrica/Integral hipsométrica	Susceptibilidad CIH			
	Joven (HI>0,6)	Maduro (HI=0,35 – 0,6)		Viejo (HI<0,35)
Estado de crecimiento de la vegetación	Procesos erosivos activos	Sin reactivación de procesos erosivos – Transporte (tiende a 0,35)	Con reactivación de procesos erosivos – Transporte (tiende a 0,6)	Cuenca sedimentaria – pérdida de capacidad erosiva
Joven (regeneración natural H <5m)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)
Maduro (H ≥5m)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Baja (1)
Senescencia (H ≥15m)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Media (2)

» *Orden de suelos (T)*. Es la taxonomía de suelos y corresponde a un sistema básico de clasificación para hacer e interpretar los levantamientos de suelos. La descripción taxonómica de estos se basa en la clasificación y estructuración que hace la Soil Survey Staff (Soil Survey, 1999). La clasificación taxonómica permite hacer generalizaciones inductivas acerca de las características de las clases de suelos y establecer interrelaciones entre ellos.

La calificación del orden de los suelos presentada en la tabla 33, se formula bajo la relación de suelos más evolucionados y en condiciones ideales que generan menor susceptibilidad para la caída de árboles, mientras que los suelos más jóvenes generan condiciones más susceptibles para la caída de DL, ya que las raíces individuales anclan el manto inferior del suelo a un estrato de suelo más estable y las raíces de vegetación leñosa se anclan en estratos firmes, prestando apoyo a capas del suelo en partes superiores de la ladera mediante apuntalamiento y arqueado.

Por ende, se infiere que, si la vegetación está integrada a una matriz de suelo evolucionada (p. e.j, los oxisoles), se ubica en una etapa de desarrollo vegetal de senectud. La tabla 33 muestra los órdenes de suelos con la relación a las etapas de desarrollo de la vegetación y la susceptibilidad a la caída de material leñoso.

» *Altura promedio de la vegetación (HV)*. La inclusión de la altura promedio de las coberturas complementa el análisis de la información relacionada con el módulo de estados de desarrollo que hace parte de la susceptibilidad por detritos leñosos. Las alturas complementan la aproximación del estado de desarrollo en el que se encuentra la vegetación e incrementa la susceptibilidad. Se infiere que a mayor altura el bosque tiende a estar en etapas de desarrollo, como madurez y senectud. Como referencia y apoyo dentro de los criterios de clasificación de los bosques en coberturas de la tierra (Posada *et al.*, 2010) se determinan unos rangos de altura promedio por tipo de cobertura (tabla 34).

» **Tabla 33.** Orden de suelos T

Orden de suelos	Susceptibilidad a caída de árboles	Susceptibilidad T
Oxisol, ultisol (antiguos)	Baja	1
Alfisol (menos antiguos)	Media	2
Molisol, andisol, espodosol (menos antiguos)		
Vertisol, aridisol (jóvenes)	Alta	3
Inceptisol, entisol, histosol (jóvenes)		

Fuente: adaptado de SGC (2015)

» **Tabla 34.** Altura promedio de la vegetación (HV)

Grandes grupos de vegetación	Altura promedio de la vegetación	Susceptibilidad a caída de árboles	Susceptibilidad HV
Fustales - Joven	Hprom=5 m - 10 m	Alta	3
Fustales - Maduro	Hprom=10 m -15 m	Media	2
Fustales - Viejo	Hprom=>15 m	Media	2
Latizales - Joven		Alta	3
Latizales - Maduro	Hprom= \leq 5 m	Baja	1
Latizales - Viejo		Media	2

» *Estado de comportamiento.* Está compuesto por los atributos de profundidad radicular (PR), carga de cobertura (CC) y estado actual de la cobertura (DC).

» *Profundidad radicular (PR).* Es un atributo del sistema radicular que indica hasta qué profundidad llegan las raíces en el suelo, lo cual está directamente relacionado con las condiciones de humedad y de resistencia del material a nivel subsuperficial. Sin embargo, la profundidad de las raíces puede favorecer una mayor infiltración del agua de lluvia. La forma como las raíces actúan en cada caso está determinada por el tipo de planta y por las condiciones del suelo del sitio. Esta variable se deriva del componente de cobertura de la tierra evaluada en los estudios de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, escala 1:100 000, de esta forma se constituye en un atributo de tipo cualitativo y no continuo (tabla 35).

» *Carga de la cobertura (CC).* Son las cargas externas de la cobertura de la tierra impuestas al terreno representadas en los estratos de la

vegetación; es decir, a mayor número de estratos, mayor peso relativo hacia el terreno, y a menor número de estratos, menor peso relativo de la vegetación hacia el terreno. Por ejemplo, en algunos casos las plantas de tipo arbóreo muy altas y de tronco ancho producen sobrepeso en el terreno susceptible de desestabilizarse, ocasionando pérdidas y movimientos de material. Esta variable se define con la capa de coberturas de la tierra del tiempo actual generada en el estudio de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25 000, constituyendo una variable de tipo cualitativa y no continua. Los valores que puede tomar la variable carga de la cobertura (CC) se explican en la tabla 36.

» *Estado actual de la cobertura (DC).* En esta variable se analiza la densidad de las coberturas. A mayor densidad de árboles, mayor cercanía; por ende, el entramado de la cobertura va a generar un efecto de retención de material leñoso o de protección que reduce el transporte de DL al canal del río. Los valores

» **Tabla 35.** Profundidad radicular

Profundidad efectiva	Rango (cm)	Susceptibilidad a caída de árboles	Susceptibilidad PR
De muy superficial a superficial	\leq 50	Alta	3
De moderadamente profundo a profundo	50 - 150	Media	2
Muy profundo	> 150	Baja	1

Fuente: adaptado de (SGC, 2015).

» **Tabla 36.** Carga de la cobertura (CC)

Peso relativo	Clasificación	Número de estratos verticales de la cobertura	Susceptibilidad	Susceptibilidad CC
0-20 %	Peso bajo	0-1	Baja	1
20-50 %	Peso moderado	1-2	Media	2
50-100 %	Peso pesado	>3	Alta	3

Fuente: adaptado de SGC (2015).

que puede tomar la variable estado actual de la cobertura (DC) se describen en la tabla 37. La densidad relativa se relaciona con el grado de fragmentación de la cobertura en función del área y la dispersión del fragmento del tipo de cobertura en un polígono respectivo, la cual se deriva de las unidades de cobertura de la tierra del tiempo actual generada en el estudio de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25 000. Esta información está definida en la leyenda Corinne Lan Cover por cada una de las coberturas arbóreas relacionadas (Posada *et al.*, 2010).

- » Agentes dinamizadores (AD).
 - *Precipitación (P)*. Es una de las principales variables a considerar, ya que la lluvia es interceptada por la vegetación y el exceso de caudal es absorbido por el suelo y la masa radicular, incrementando el grado de saturación hídrica del suelo, lo que podría también incrementar la susceptibilidad al desprendimiento de suelo en zona de pendiente acompañado de material leñoso.

En esta variable se retoma el enfoque de análisis del detonante lluvia en el marco de evaluar las curvas de intensidad/duración/frecuencia, en función de los periodos de retorno. A partir de lo anterior se relaciona que a mayor magnitud, frecuencia e intensidad en periodos de retorno, menor es la susceptibilidad a caída de DL (tabla 38).

Para determinar las relaciones de susceptibilidad de la lluvia generadas en la tabla 38, se establece una calificación por cada atributo: periodos de retorno, duración en minutos y los valores de las curvas de duración/intensidad/frecuencia en mm/h evaluados, como se detalla en las tablas 39, 40 y 41.

A partir de lo anterior, se realiza la evaluación cualitativa de la susceptibilidad teniendo en cuenta la respuesta por cada atributo (tabla 42), la cual está descrita en la tabla 38 en el atributo de susceptibilidad por P.

» **Tabla 37.** Estado actual de la cobertura

Códigos coberturas de la tierra	Densidad relativa (%)	Susceptibilidad	Susceptibilidad DC
Bosque denso alto de tierra firme, bosque denso bajo de tierra firme, arbustal denso.	100-90	Baja	1
Bosque abierto alto, bosque abierto bajo.	90-70	Media	2
Bosque fragmentado con vegetación secundaria, bosque fragmentado con pastos y cultivos, plantación forestal.	70-50	Media	2
Arbustal abierto, herbazal denso de tierra firme arbolado, herbazal denso de tierra firme con arbustos, vegetación secundaria baja, vegetación secundaria alta.	50-40	Allta	3
Mosaicos heterogéneos agrícolas	40-30	Allta	3
Pastos, áreas abiertas sin o con poca vegetación.	<30	Alta	3

» **Tabla 38.** Relación de la precipitación con la susceptibilidad a DL

Duración (min)	Curvas intensidad/duración/frecuencia (valores en mm/h)						Susceptibilidad P					
	Periodo de retorno (años)											
	2	5	10	20	50	100						
10	147,9	174,4	197,6	223,9	264,0	299,1	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Baja (1)	Baja (1)
20	93,6	110,4	125,1	141,7	167,1	189,3	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)
30	71,6	84,5	95,7	108,4	127,9	144,8	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)
120	28,7	33,8	38,3	43,4	51,2	58,0	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)
130	27,2	32,1	36,4	41,2	48,6	55,0	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)
160	23,7	28	31,7	35,9	42,4	48	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)
180	22	25,9	29,3	33,2	39,2	44,4	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)

Fuente: adaptado de Acosta Castellanos (2017)

» **Tabla 39.** Relación de la duración (min) con la susceptibilidad P

Duración (min)	Susceptibilidad	Susceptibilidad P
10	Baja	1
20-30	Media	2
>30	Alta	3

» **Tabla 40.** Relación del periodo de retorno (Tr) con la susceptibilidad P

Periodo de retorno (Tr)	Susceptibilidad	Susceptibilidad a P
2-5	Alta	3
10-20	Media	2
50-100	Baja	1

» **Tabla 41.** Relación curvas intensidad/duración/frecuencia (valores en mm/h) con la susceptibilidad P

Curvas intensidad/duración/frecuencia (valores en mm/h)	Susceptibilidad	Susceptibilidad P
≤25	Baja	1
25-70	Media	2
>70	Alta	3

» **Tabla 42.** Evaluación cualitativa de susceptibilidad por atributo

Evaluación	Susceptibilidad
Alta*Alta*Baja	Media
Alta*Alta*Media	Alto
Bajo*Media*Alto	Media
Bajo*Bajo*Alto	Baja

» **Tabla 43.** Vientos (V)

Velocidad del viento mensual multianual (km/h)	Susceptibilidad	Susceptibilidad V
0-12	Baja	1
13-29	Media	2
>30	Alta	3

Fuente: Kin y Ledent (1996).

- **Vientos (V).** Los vientos con velocidades mayores de 30 km/h (muy habituales en las tormentas atmosféricas) pueden ocasionar la caída de arbolado que presente factores desfavorables (enfermo, raíces muy superficiales, elevada relación biomasa aérea/biomasa subterránea, etc.). Los valores que puede tomar la variable vientos (V) se describen en la tabla 43.

Una vez se tengan todas las variables cuantificadas se debe calcular el índice de susceptibilidad de aportes por detritos leñosos (DL), descrito en la tabla 30, la cual define las zonas de mayor o menor aporte por DL.

7.2.1.2. Cuantificación de volúmenes DL

En esta sección se presentan los lineamientos generales para cuantificar los detritos leñosos distribuidos por zonas de aporte y acumulaciones leñosas identificadas en el río o en la zona de inundación cercana.

7.2.1.2.1. Por zonas de aporte

La metodología de estimación de volúmenes de detritos leñosos e identificación de puntos de represamiento en el cauce contempla diferentes procesos que, dependiendo de la información disponible y procesada de la zona de estudio a nivel de identificación de zonas de susceptibilidad alta y media por DL y el acceso de origen primario (datos tomados en campo) o secundario (información existente) del inventario forestal, se delimitará la zona de aporte de detritos leñosos. El inventario forestal consiste en una recopilación completa y sistemática de datos como densidad de árboles por unidad de área, tipo de especie, diámetro a la altura de pecho (DAP), altura y edad de los individuos.

Si en la zona de estudio no se cuenta con un inventario forestal, se debe hacer un levantamiento de parcelas anidadas aleatorias de latizales y fustales con una longitud mayor a 1 m, por tipo de cobertura arbórea, y para las zonas con tipos de susceptibilidad por DL alta y media, identificando longitud, diámetro a la altura del pecho (DAP), densidad arbórea, altura total y altura comercial. A nivel de dosel alto (fustales) el tamaño de la parcela es de 20 × 20 m y a nivel de dosel medio (latizales) es de 10 × 10 m.

Con la información de altura, DAP y densidad de individuos en las zonas con cobertura arbórea, se determina el ancho aferente (B) extendido a ambos costados del cauce y definido como un criterio ecosistémico. Dicho ancho representa las áreas activas de captación y aporte de detritos leñosos, donde las especies fustales tienen un potencial de incorporarse en el flujo e influir considerablemente en los procesos geo-

morfológicos (Piton y Recking, 2016). Según Mazzorana *et al.* (2009), la longitud planimétrica del ancho aferente, tanto para pendientes de laderas (ζ) inferiores al 40 % como para pendientes iguales o superiores al 40 %, se determina con la ecuación (40).

$$B = \begin{cases} hf & \text{si } \zeta < 40 \% \\ k \cdot hf & \text{si } \zeta \geq 40 \% \end{cases} \quad (40)$$

Fuente: Mazzorana *et al.* (2009).

Donde, B es la longitud del ancho aferente, h_f es la altura del individuo fustal más alto en la zona con cobertura arbórea y k es un coeficiente que varía entre 1,5 y 2,4, dependiendo si la pendiente de las laderas es moderada ($< 40\%$) o escarpada ($\geq 40\%$).

Como complemento, y en función de las características fisionómicas de la vegetación natural de Colombia, los datos de altura máxima a nivel de fustales y por ser especies de bosque natural en su mayoría, se recomienda trabajar con el doble de la altura máxima a nivel de fustal. La información de la altura máxima de los fustales representada en el mapa de coberturas de la tierra CLC 2005-2007 (Posada *et al.*, 2010) fue obtenida de trabajo de campo y diversos inventarios forestales donde los árboles oscilan entre 15 m y 30 m, lo cual no es significativo cuando el ambiente fluvial a nivel geomorfológico incluye geoformas como llanura inundable, terraza reciente, escarpes, depósitos fuera del cauce permanente, islas (de llanura o de terraza), cauces secundarios, meandros abandonados, sistemas lénticos y aquellas porciones de la llanura inundable antropizadas, que hacen que se presenta cierta dinámica adicional que lleve a que el ancho aferente se amplifique a lo definido en función de la altura del fustal más alto. Por lo anterior, se recomienda que cuando las características del ancho aferente sean reguladas por la alta presencia de vegetación arbórea, prime el criterio ecosistémico (doble de la altura máxima a nivel de fustal). Pero, si las condiciones de paisaje son combinadas (menor presencia de vegetación y mayor visibilidad de las geoformas), se deberá incluir criterios geomorfológicos (a nivel de corriente de montaña y piedemonte)

como las zonas de depósitos y acumulación de sedimentos, por ejemplo en los tramos sinuosos toda la faja de sinuosidad, la faja de trenzamiento, y en tramos anastomosados incluir las terrazas adyacentes a las riberas a los lados del cauce que aporten en la definición del área aferente por tipo de cuenca de trabajo. Es decir, las zonas de aporte no solo van a estar direccionadas a la cuenca alta, sino que van a depender del área de susceptibilidad alta y media por DL a lo largo del canal del río.

A partir de la definición del ancho aferente, proyectado a ambos costados del cauce principal en cada unidad de modelación, se procede a estimar el volumen de detritos leñosos a partir de formulaciones empíricas (Piton y Recking, 2016). Existen dos alternativas para esta cuantificación: (i) volumen (m^3), expresado en función de la determinación de la longitud del cauce (km) con cobertura arbórea dentro del ancho aferente (L_b), como se muestra en la ecuación (41); y (ii) volumen (m^3) como función del cálculo del área con cobertura arbórea dentro del ancho aferente (A_b), como se muestra en la ecuación (42).

$$V_{lb} = 40 \cdot L_b^2 \text{ para } L_b < 20 \text{ km} \quad (41)$$

$$V_{ab} = 90 \cdot A_b \quad (42)$$

Fuente: Piton y Recking (2016).

Donde, V_{lb} y V_{ab} son los volúmenes de detritos leñosos (m^3) dentro de la zona activa de captación a partir de la longitud del cauce con cobertura arbórea L_b (km) y el área con cobertura arbórea A_b (km^2), respectivamente.

Una vez se tiene la estimación de volúmenes de detritos leñosos V_{lb} y V_{ab} , dichos valores se comparan entre sí para escoger el volumen que corresponda al mayor aporte, definiéndose como (V_L). Esta definición de volúmenes estará relacionada a las zonas de susceptibilidad alta y media por detritos leñosos (DL) ubicadas en la respectiva área aferente.

Adicionalmente al valor de volumen total estimado de DL en el ancho aferente por Susceptibilidad alta y media, se le sumará un residual de volumen del 10 % del volumen generado a nivel

de susceptibilidad alta por DL, ya que por procesos de dinámica antrópica o natural se pueden producir transportes de material leñoso hacia la zona aferente por diferentes factores externos de movilización como tala selectiva, crecientes súbitas, picos altos de precipitación que puedan generar arrastre de material leñoso, entre otras actividades (Sobota *et al.*, 2006).

De acuerdo con Piton y Recking (2016), los individuos fustales ubicados en proximidad a las bancas del cauce, pueden ser arrancados e incorporados al flujo cuando el caudal de la corriente aumenta. Los troncos transportados tienden a quedar atrapados por captación de detritos leñosos existentes en el cauce, o simplemente, grandes troncos individuales pueden ocupar un ancho sustancial del río. Por ende, los puntos o zonas propensos a generar acumulaciones leñosas a lo largo del cauce pueden identificarse cuando la relación entre el ancho del canal, en

un punto determinado, y la altura del tronco sea menor o igual a 1 s.

7.2.1.2.2. Acumulaciones leñosas (AL)

Se medirán todos los troncos mayores a 10 cm de diámetro y 1 m de largo (Abbe *et al.*, 2003; Andreoli *et al.*, 2007), se medirán con cinta métrica tanto en el cauce activo como en la planicie de inundación adyacente ubicada dentro del área aferente. El volumen de cada elemento se calcula a partir de su diámetro medio y de su largo, asumiendo una forma de cilindro sólido (Cordova *et al.*, 2007).

De igual manera también se medirán las acumulaciones leñosas autóctonas, es decir, los elementos que no fueron transportados fluvialmente y que provienen de los márgenes o de la planicie de inundación del cauce en las proximidades a la ubicación de la acumulación (Abbe *et al.*, 2003).



Para la caracterización y cuantificación de estas acumulaciones leñosas se sugiere el diligenciamiento de un formato de campo (anexo 5), donde se identifican los tipos de acumulaciones leñosas y se realizan las respectivas mediciones a nivel de longitud, DAP, área basal, generación del volumen (suponiendo la ecuación de cilindro sólido), especie forestal relacionada, ubicación y descripción cualitativa de los efectos morfológicos que generan dichas acumulaciones de DL en el río, como protección o erosión de las márgenes del cauce, desviación o bifurcación del cauce y retención de sedimentos.

El levantamiento de información depende de la actividad de fotointerpretación en oficina donde se ubiquen los puntos críticos de las acumulaciones leñosas (AL) con ayuda de los sensores remotos y la segmentación del canal del río en tramos para realizar un muestreo en función del cambio de la morfología del canal. En el caso de las cuencas pequeñas con una adecuada accesibilidad, se hará un muestreo al 100 %, y cuando la cuenca es muy grande se tendrá en cuenta el muestreo aleatorio con criterio temático para definir los puntos de ubicación de toma de los datos. Los datos de volumen de campo (V_{AL}) obtenidos en los puntos críticos de acumulaciones leñosas se suman a los volúmenes generados en las zonas de aporte ubicados en la susceptibilidad alta por DL.

7.2.1.3. Represamientos por detritos leñosos

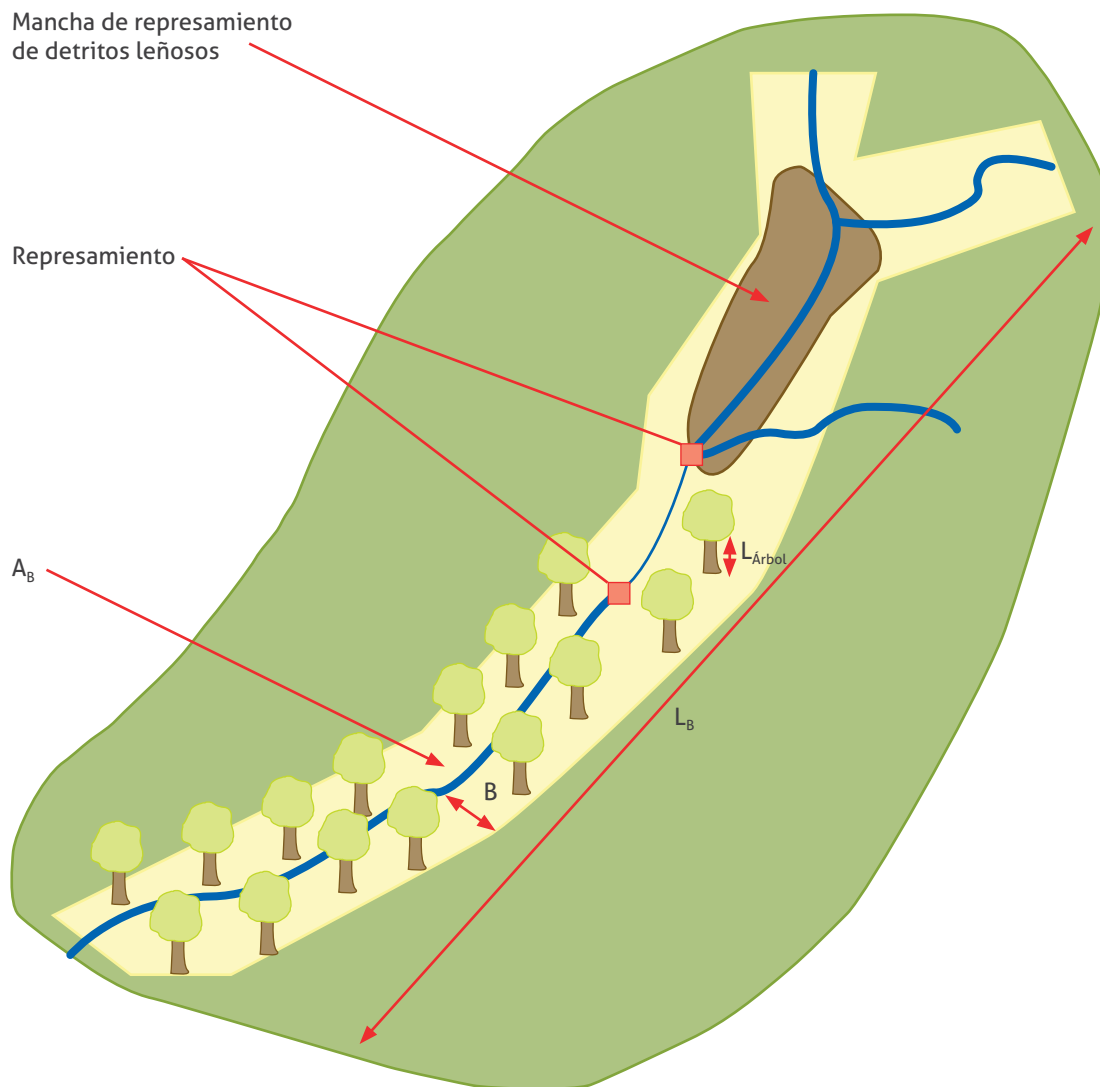
Finalmente, el volumen estimado de detritos leñosos (V_L) y el volumen de acumulaciones leñosas (V_{AL}) se asocian a los puntos de represamientos anteriormente identificados, donde se establece una mancha o área de acumulación (figura 49). La metodología no está encaminada a simular el transporte individual de los detritos leñosos, ni

tampoco a identificar la orientación de estos en el proceso de entrabamiento en un punto de represamiento. Adicionalmente, la estimación de volúmenes de detritos leñosos (V_L) y el volumen de acumulaciones leñosas (V_{AL}) no se incorporan en el cálculo de los volúmenes de aporte de sólidos descritos en el capítulo 5. La razón de esto es que el transporte de detritos leñosos ocurre en la superficie del flujo y no forman parte de su concentración de sólidos. Por consiguiente, la reología del flujo no se ve alterada de la misma forma en que se ve modificada por el transporte de sólidos (p. ej., gravas, arenas, limos, arcillas). Así, el resultado del presente procedimiento es la identificación de puntos de represamiento leñosos largos a lo largo del cauce (relación entre el ancho del canal y longitud del tronco ≤ 1) y la definición de manchas de acumulación de detritos leñosos en dichos puntos de represamiento, como se muestra en la ecuación (43).

La evaluación de los escenarios de rompimiento de estos represamientos o modificaciones en la dirección del flujo deberán ser considerados en el momento de realizar la simulación fluidodinámica del evento en estudio, usando las herramientas de modelación apropiadas y reconocidas en la literatura científica para estos propósitos.

$$MDL = \frac{V_L + V_{AL}}{\max(DAP)} \quad (43)$$

Donde, MDL es el área de acumulación de detritos leñosos, V_L es el volumen estimado de detritos leñosos, V_{AL} es el volumen de campo de detritos leñosos en los puntos de acumulaciones leñosas y $\max(DAP)$ es el máximo diámetro medido a la altura de pecho de los especímenes fustales dentro de la cobertura arborea



» **Figura 49.** Puntos de acumulación de detritos leñosos largos en el cauce

7.3. Análisis de otros escenarios

A continuación, se describen los escenarios anteriormente mencionados de acuerdo con las apreciaciones realizadas por Costa y Schuster (1988) y la actualización por parte de Fan *et al.* (2020).

La obstrucción de un cauce debido a un movimiento de masa como escenario adicional en la evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales se considera para los represamientos causados por movimientos en masa de las laderas adyacentes a este. Un movimiento en masa

puede formar un represamiento completo o parcial cuando alcanza el valle del cauce y bloquea parcial o completamente la sección transversal del cauce. El volumen represado depende de varios factores, incluyendo la velocidad del deslizamiento y las características de su depósito (p. ej., volumen, espesor y forma), topografía (p. ej., ancho y forma del valle) y la hidrología de la cuenca (p. ej., caudal del río y capacidad de transporte). Fan *et al.* (2020) presentan una clasificación basada en la geomorfometría (tabla 44) y clasifican los tipos de represamiento en función del tipo de movimiento de masa.



→ Puente Santa Coloma
Río Frio, Floridablanca, Santander 2020
Fotografía de Michael Rangel

» **Tabla 44.** Recopilación de Fan *et al.* (2020) para la clasificación de represamientos según la geomorfometría propuesta por Costa y Schuster (1988) y Hermanns *et al.* (2011)

Esquema	Descripción
	Represamientos relativamente pequeños al tamaño del valle que no alcanzan la ladera opuesta.
	Grandes represamientos, pero aún así pequeños comparados con las dimensiones del valle. Este es uno de los tipos más generalizados, frecuentemente se forman por movimientos de masa del tipo rotacional o translacional.
	Represamientos muy grandes que ocupan el valle de lado a lado. El material colapsado está distribuido aguas arriba y aguas abajo desde el cuerpo principal del movimiento en masa. En algunas ocasiones el depósito resulta en una forma de T.
	Estos represamientos se forman del movimiento simultáneo de dos movimientos de masa desprendidos de las laderas opuestas del mismo valle.
	Varios movimientos de masa forman múltiples lenguas de un solo deslizamiento. No son muy comunes para movimientos de masa de suelo o roca, pero lo son para movimientos de glaciares.
	Movimientos en masa con superficies de ruptura.
	Los lagos sobre movimientos de masa en depósitos de movimientos de masa son frecuentes en depósitos de grandes deslizamientos de roca, pero pueden ocurrir en todos los tipos de movimiento en masa. No están conectados dentro del canal del río represado.
	Distribución de múltiples represamientos en línea formados por un solo movimiento de masa a lo largo de un valle.
	Represamiento que afecta la división de aguas, donde el movimiento de masa se deposita directamente en la división del drenaje.
	Un solo represamiento que tiene diferentes formas que se distinguen entre un deslizamiento de roca que atraviesa el valle parcial o totalmente, un deslizamiento de rocas que afecta el fondo del valle y deslizamiento de rocas que, después de impactar el fondo del valle, se extiende aguas arriba y aguas abajo (similar al tipo III de Costa y Schuster (1988)).

Leyenda:

-  Represamiento por movimiento de masa.
-  Cauce principal.
-  Lago formado por el represamiento.
-  Cauce tributario.
-  Dirección de flujo.

Fuente: Fan *et al.* (2020); Costa y Schuster (1988) y Hermanns *et al.* (2011).

Aunque todos los movimientos de masa son potencialmente generadores de un represamiento del cauce, los movimientos predominantes y relacionados con las avenidas torrenciales o los deslizamientos complejos se caracterizan por transportar material de las laderas y de los depósitos en el fondo y en las bancas del cauce. En estos casos, el represamiento generado no se da en el punto en el que ocurrió el movimiento de masa, sino en algún punto, aguas abajo, donde la topografía permita las condiciones para la deposición de material y el consecuente represamiento del cauce.

La probabilidad de formación de un represamiento y la probabilidad de que este falle ha sido objeto de estudio a través de índices morfométricos. La tabla 45 presenta un resumen de los índices que se han usado en inventarios de represamien-

tos por movimientos de masa en Italia y en Japón; mientras que la tabla 46 presenta los índices de estabilidad y los umbrales que fueron calculados en inventarios de represamientos por movimientos de masa en países como Italia, Nueva Zelanda y Perú (1a: Swanson *et al.* (1986); 1b y 4: Tacconi *et al.* (2016); 2: Dal Sasso *et al.* (2014); 3: Ermini (2003)). Los índices de estabilidad fueron calculados en función de parámetros morfométricos (tamaño y volumen de la presa), hidrológicos (río, cuenca, cuerpo de agua represado, clima) y geotécnicos (propiedades geotécnicas de la presa). La identificación de potenciales puntos de represamiento puede verse apoyada en información de represamientos previos, a través de inventarios de movimientos de masa o información de los depósitos identificados en la caracterización de avenidas torrenciales.

» **Tabla 45.** Recopilación propuesta por Fan *et al.* (2020) de índices para evaluar la probabilidad de formación de un represamiento

Ref.	Índice	Descripción	Ecuación	Formación de presa	No formación de presa	Región
1a	Índice anual de estrechamiento	Relaciona el ancho del valle (W_v) con la velocidad del movimiento de masa (v , [m/año]),	v/W_v	> 100	-	Japón
1b		En este caso la velocidad está en unidades m/s, considerándola como un parámetro evaluado empíricamente.	$\log(v/W_v)$	< 4,26	> 6,88	Italia
2	Índice adimensional controlado por la morfología	Relaciona la velocidad del movimiento de masa (v), la densidad del material deslizado ρ_L y el volumen deslizado (V_L) con el ancho del valle (W_v), la densidad del agua (ρ_w), la aceleración de la gravedad (g), profundidad del río (h), ancho del deslizamiento (W_L).	$\frac{2\rho_L v^2 V_L}{\rho_w g h^2 W_v W_L}$	> 1	< 1	Italia
3	Índice adimensional de estrechamiento	Este índice tiene en cuenta la erodibilidad del material del represamiento en la estimación de la estabilidad, teniendo en cuenta la velocidad del deslizamiento (v), ancho y alto del deslizamiento (W_L , H_L), la distribución granulométrica (D_{30}), el caudal con un periodo de retorno de 5 años (Q_p) y el ancho del valle (W_v).	$\frac{v W_L H_L D_{30}}{Q_p W_v}$	> 0,002		Italia
4	Índice morfológico de obstrucción	Correlación entre el volumen del deslizamiento (V_L) y el ancho del valle (W_v)	$\log V_L/W_v$	> 4,6 -	< 3 < 3,08	Italia Perú

Fuente: 1a: Swanson *et al.* (1986) 1b y 4: Tacconi Stefanelli *et al.* (2016); 2: Dal Sasso *et al.* (2014); 3: Ermini (2003)

» **Tabla 46.** Compilación de índices para evaluar la probabilidad de falla de los represamientos por movimientos de masa, propuesto por Fan *et al.* (2020)

Ref.	Índice	Ecuación	Estable	Incierto	No estable	Región	Observaciones
1a	Índice de obstrucción	$\log (V_D/A_C)$	>5	4-5	3-4	Italia	
1b			>5	4-5	<4	Italia	
2a	Índice de llenado	$\log (V_D/V_L)$	>0	NA	<0	Italia	
2b			>1	NA	<1	Nueva Zelanda	
3a	Índice de obstrucción adimensional	$\log A_C (H_D/V_C)$	<2,75	2,75-3,08	>3,08	Mundial	
3b			<3	3-5	>5	Nueva Zelanda	
3c			<2,43	2,43-3,98	>3,98	Italia	
4	Índice de bloqueo	$\log (H_D^2/V_L)$	>0	(-3) - 0	< (-3)	Nueva Zelanda	$[m^2 / m^2]$
5	Índice de la cuenca	$\log (H_D^2/A_C)$	>3	NA	<3	Nueva Zelanda	$[km^2 / km^2]$
6	Índice de relieve	$\log (H_D/H_R)$	>(-1)	NA	< (-1)	Nueva Zelanda	$HR = E_{máx} - E_{mín} - H_D$ (altitud máxima y mínima en la cuenca)
7a	Índice de hidromórfico	$\log V_D / (A_C \times S)$	>7,44	5,74-7,44	<5,74	Italia	
7b	de estabilidad de la presa		>8,07	5,26-8,07	<5,26	Perú	

Fuente: 1a: Fan *et al.* (2020); 1b, 2a Casagli y Ermini (1999); 2b, 3b, 4, 5, 6: Korup (2004); 3a: Ermini y Casagli (2003); 3c, 7a: Tacconi Stefanelli *et al.* (2016); 7b: C. Tacconi Stefanelli *et al.* (2018).

En la tabla 46, V_D , A_C , V_L , H_D , y S son respectivamente: volumen de la presa, área de la cuenca, volumen del lago formado por la presa, altura de la presa, y pendiente del lecho del río.

La disponibilidad de la información y su fácil acceso determinará qué índices se podrán utilizar en las evaluaciones de formación y falla de los represamientos, pero es importante tener en cuenta su variabilidad. Cuanta más información se tenga sobre los materiales y procesos previos de similares características, mejor se podrá establecer un comportamiento regional de estos umbrales (p. ej., bases de datos). La variabilidad de los umbrales obedece a su naturaleza empírica y a las diferencias entre regiones (Tacconi *et al.*, 2016; 2018), además, pueden variar si estos se llegaran a establecer por tipo de movimiento en masa (Dufresne *et al.*, 2018; Miller *et al.*,

2018). Las comparaciones realizadas por Fan *et al.* (2020) sugieren que los índices propuestos en la tabla 46 pueden ser de ayuda para clasificar los represamientos por movimientos de masa pasados y permitirían el ajuste de algunos parámetros. Sin embargo, se recomienda cautela al ser utilizados en la toma de decisiones en casos de represamientos actuales. Para esto se requieren índices geotécnicos o criterios de estabilidad que consideren la estructura interna y la composición de la presa generada. La incorporación de estos eventos a la simulación del flujo de avenida torrencial deberá considerar las características que condicionan su ocurrencia y detallar sus efectos sobre la dinámica del material transportado. Será decisión de cada consultor establecer las metodologías y análisis correspondientes para describir dichos procesos.





Río Guatiquia
Villavicencio, Mctá. 2018
Fotografía de Andrés Reyes



8

Recomendaciones finales



↳ Río Negro
Dabeiba, Antioquia
Fotografía de Andrés Reyes

En el marco de la normatividad vigente referente al Decreto 1077 de 2015, específicamente su sección 3, los resultados de la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales deben ser presentados en un “documento técnico que contenga la metodología empleada y los resultados obtenidos”. Además, la norma establece que “los estudios técnicos deben ser elaborados y firmados por profesionales idóneos en las materias”. En este sentido, a continuación, se exponen recomendaciones sobre la presentación de resultados y perfiles profesionales requeridos para la aplicación de la metodología.

8.1. Presentación de resultados

El informe resultado de la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales debe conservar la estructura metodológica aquí propuesta, describir la generación de cada uno de las secciones aquí expuestas e incluir como mínimo los capítulos que se enlistan en esta numeral, además de la geodatabase que se detalla a continuación:

8.1.1. Estructura de la base de datos geográfica GDB

La estructura de la base de datos geográfica en su componente temático debe contener siete conjuntos de datos (*feature datasets*) con sus respectivos elementos de clase (*feature class*), tal como se presenta en la tabla 47.

La cartografía básica a escalas 1:2000 y 1:25 000 debe incorporarse como conjunto de datos en la anterior GDB; sin embargo, los modelos digitales de terreno (1:2000, 1:25 000 o integrados) deben estar por fuera de la estructura de esta base de datos

8.1.2. Área de estudio e información insumo

El área de estudio estará dispuesta mediante archivo “AreaEstudio” que se relaciona en la tabla 47 y debe contener el polígono de la cuenca de análisis y la zona de depósito delimitadas por separado. El perímetro del área de estudio debe contener el centro poblado o casco urbano y demás elementos expuestos.

8.1.3. Caracterización de avenidas torrenciales

Todos los productos cartográficos deben estar contenidos en la geodatabase propuesta en la tabla 47. De igual manera, la descripción de los resultados y su análisis deben quedar por escrito en un documento soporte en el que se adjunten los formatos diligenciados a partir de información secundaria y trabajo de campo (anexos 1, 2 y 4).

8.1.3.1. Inventario de avenidas torrenciales históricas

El inventario de avenidas torrenciales históricas del municipio debe presentarse en formato PDF a partir del formato Excel propuesto para tal fin (anexo 1). También, debe complementarse con la información obtenida de la encuesta de percepción del riesgo y descripción de eventos; se deben adjuntar como documentos soporte los formatos originales de las encuestas realizadas (anexo 4). De igual manera, debe entregarse en el archivo “InventarioAvT” relacionado en la tabla 47, y contener la cartografía de los elementos que constituyen un evento de este tipo (sección 3.2.1.1.3.). Los campos que debe contener este archivo se describen en el anexo 1.

También debe generarse el archivo “InventarioMM” relacionado en la tabla 47 con el inven-

» **Tabla 47.** Estructura general de la base de datos geográfica

Tema	Clase/tablas y raster	Tipo dato o entidad
Amenaza	<<AmenazaAvT_25k>>	Polígono
	<<AmeFluidoDinamica_25k>>	Polígono
	<<AmenazaAvT_2k>>	Polígono
	<<AmeFluidoDinamica_2k>>	Polígono
Factores condicionantes	<<ZonasEvaluacion2k>>	Polígono
	<<UGSAvT>>	Polígono
	<<Estratificacion>>	Punto
	<<Fallas>>, <<Lineamientos>>, <<Pliegues>>	Línea
	<<GeoformasAvT>>	Polígono
	<<AreasErosion>>	Polígono
	<<PuntosModelacion>>	Punto
Hidrología	<<UnidadesModelacion>>	Polígono
	<<CuencasContribuyentes>>	Polígono
	<<CuencaAnálisis>>	Polígono
	<<IndiceHack>>	Punto
	<<LineasIndiceHack>>	Línea
Información Campo	<<PuntosConcentracion>>	Punto
	<<EstacionCampoAvT>>	Punto
	<<PuntosConteoClastos>>	Punto
	<<FormatoInventarioAvT>>	Punto
	<<PuntosMuestraLaboratorio>>	Punto
	<<PuntosRedGeodesica>>	Punto
	<<SeccionesTransversales>>	Línea
<<SeccionGeomorfologica>>	Línea	
MapaBase	*	*
MapaLocalizacion	<<PuntosInteres>>	Punto
	<<AreaEstudio>>	Polígono
	<<Departamentos>>	Polígono
	<<OrigenSistemasCoordenadas>>	Línea
	<<Pais>>	Polígono
	<<Planchas100k>>	Polígono
Morfodinámica	<<Planchas25k>>	Polígono
	<<PlanchasAreaEstudio>>	Polígono
	<<InventarioAvT>>	Polígono
Susceptibilidad	<<InventarioMM>>	Polígono
	<<RasgosGMF>>	Línea
	<<D90_D50_Dmax>>	Polígono
	<<SusceptibilidadGeomorfologica>>	Polígono
	<<EventosRecientes>>	Polígono
Susceptibilidad	SerieTempCaudalLiquido	Tabla
	SerieTempCaudalSolido	Tabla
	VolumenSolidos	Tabla
	FormatoDepositoAvT	Tabla

* De acuerdo a estructura de datos definida por IGAC para la escala de trabajo.

tario de movimientos en masa detonados en el evento fluviotorrencial generado según los lineamientos de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa* (Rodríguez *et al.*, 2017). El archivo del inventario de movimientos en masa debe incluir un campo

llamado “Aporte_AvT”, el cual se debe diligenciar con “Si” o “No”, según si el movimiento en masa aportó sedimentos a la avenida torrencial. Otro de los archivos que debe crearse es “RasgosGMF” (tabla 47) correspondiente a los rasgos geomorfológicos resultantes de los procesos



de erosión desarrollados durante cada evento (erosión lateral, cárcavas, etc.), el cual debe construirse según los lineamientos de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez et al., 2017). Por otra parte, el análisis resultante de los eventos registrados en el inventario junto con su representación cartográfica debe quedar por escrito en el capítulo de la caracterización de avenidas torrenciales, donde se definen los intervalos de recurrencia promedio de los eventos con magnitudes similares y el análisis multitemporal de las avenidas torrenciales, si la información encontrada así lo permite.

8.1.3.2. Caracterización de avenidas torrenciales

Como productos de la caracterización de avenidas torrenciales están: el archivo “UGSAvT”, relacionado en la tabla 47, con la cartografía de los depósitos caracterizados a lo largo de las zonas de tránsito y depósito; este archivo incluirá los mismos campos que el archivo “InventarioAvT”, excepto por la altura de la lámina de agua (tabla 5). De igual manera, el campo de “sedimentos depositados” se debe modificar por “descripción de los depósitos”, donde se hace una descripción general de las propiedades sedimentológicas más representativas encontradas en cada polígono (granulometría, estructuras sedimentarias, meteorización). El campo de “Zona”

también debe modificarse a “Cod”, donde es diligenciado el acrónimo del tipo de depósito o macizo cartografiado, para ello se recomienda implementar la nomenclatura para unidades geológicas superficiales propuesta en la *guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez et al., 2017). Al acrónimo se le debe agregar un número consecutivo que refleje la temporalidad relativa del depósito definido mediante la interpretación geomorfológica y las evidencias de campo; por ejemplo: suelo transportado de flujo de lodos 1 (Stfl-1) para los depósitos más antiguos. Por último, la tabla de atributos también debe contener el rango de GSI de los macizos y el espesor asociado a suelos residuales y depósitos que fueron cartografiados a lo largo de la zona de tránsito. Al igual que los demás productos, los resultados de esta etapa quedarán soportados en el capítulo de la caracterización de avenidas torrenciales, donde se describen las evidencias de campo que argumentan la cartografía elaborada, incluyendo los formatos utilizados en campo (anexos 1, 2 y 4), el registro fotográfico y demás medios utilizados en la toma de información.

8.1.3.3. Geomorfología indicativa de aporte y depósito

La geomorfología indicativa que parte de las subunidades geomorfológicas de la caracterización

geoambiental, en la aplicación de esta guía para el caso de avenidas torrenciales, debe enfatizar en la cartografía de las geoformas indicativas de aporte y depósito con campos que permitan diferenciarlas. Para ello se recomienda un campo (Unid_Indic) donde se diligencie el tipo de geoforma indicativa: torrencial aporte o torrencial depósito y en otro campo (Zon_Geomor), en donde se identifiquen las categorías de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales (baja, media, alta) asignadas a las geoformas según su temporalidad relativa. Las descripciones de los campos sugeridos se enlistan a continuación: es el archivo “GeoformasAvT” relacionado en la tabla 47.

- » CodGmf: acrónimo de la geoforma.
- » NomGmf: nombre de la geoforma.
- » Unid_Indic: se debe diligenciar si la unidad es indicativa de torrencial aporte o torrencial depósito, para el caso que no aplique se pone “N/A”.
- » Zon_Geomor: se debe diligenciar con las categorías baja, media, alta o N/A según la temporalidad de los depósitos que definen la geoforma (aquí se pueden calificar tanto geoformas de aporte como de depósito según el criterio del profesional).

» Fuente: fuente a partir de la cual fue definida la geoforma, por ejemplo, los números de los vuelos y las fotografías aéreas usadas para la fotointerpretación, el tipo de imágenes satelitales implementadas (Landsat, Sentinel, etc.), trabajo de campo.

» Observaciones: información adicional que se considere pertinente.

Asimismo, la geomorfología indicativa también debe estar soportada dentro del capítulo de la caracterización de avenidas torrenciales donde se describan las evidencias de campo que argumentan la cartografía elaborada; por tanto, contendrá el registro fotográfico y demás información resultante del proceso de fotointerpretación y del trabajo de campo (anexos 1, 2 y 4).

8.1.3.4. Zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales a partir de la geomorfología

El producto de la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a avenidas torrenciales es el archivo “SusceptibilidadGeomorfológica” relacionado en la tabla 47, generado del archivo “GeoformasAvT”. Debe contener las geoformas indicativas de depósito clasificadas en categorías de amenaza baja, media y alta, según la temporalidad relativa asignada a cada geoforma. De igual



manera, este producto estará respaldado dentro del capítulo de esta etapa de la evaluación de la amenaza, donde se describa el proceso de fotointerpretación, los insumos implementados, las evidencias de campo que confirman la temporalidad de las geoformas y, finalmente, el análisis de la zonificación resultante.

8.1.3.5. Descargas y velocidades a partir de las evidencias de avenidas torrenciales recientes

Los resultados de los métodos empíricos utilizados para el cálculo de velocidades y descargas deben ser plasmados e interpretados como un numeral dentro del capítulo de caracterización de avenidas torrenciales, el cual debe ser soportado con las alturas de flujos georreferenciadas y adquiridas de información secundaria o trabajo de campo.

8.1.3.6. Inventario de movimientos en masa y análisis multitemporal a lo largo de la zona de tránsito

La generación y representación de la capa de inventario de movimientos en masa debe realizarse según los lineamientos de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez et

al., 2017). Debido a que uno de los objetivos del análisis multitemporal de movimientos en masa, incluyendo el inventario realizado en campo, es identificar aquellos movimientos que pueden generar represamientos, se debe tener una columna en la tabla de atributos de *feature class* donde se defina si el movimiento puede ocasionar represamiento del canal. El análisis resultante debe estar soportado por escrito en un documento o como un capítulo dentro de la caracterización de avenidas torrenciales con las evidencias adquiridas a partir de fotointerpretación y trabajo de campo. En este análisis se enfatizará en los movimientos en masa que a través del tiempo han sido fuente directa de sedimentos, y cuáles de ellos debido a su volumen desplazado y morfología del canal son considerados potenciales generadores de represamientos.

Los formatos con los cuales fue levantado el inventario de movimientos en masa deben quedar como soporte de este producto y cargarse al Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA).

8.1.3.7. Puntos de interés

Este producto debe representarse dentro del archivo “PuntosInteres” relacionado en la tabla 47, contiene los puntos georreferenciados toma-



dos en campo que se deben tener en cuenta en la modelación fluidodinámica, por ser posibles zonas de represamiento o cuyas características morfométricas y geológicas den lugar a cambios importantes en la velocidad y poder erosivo de un flujo. El archivo “IndiceHack” relacionado en la tabla 47 debe incluir el producto resultante del cálculo del índice SL. Por otra parte, la interpretación de los resultados obtenidos mediante el índice de SL y los puntos de interés identificados en campo debe describirse dentro del capítulo de la caracterización de avenidas torrenciales.

8.1.3.8. Volúmenes de sedimentos por unidades de modelación

Estos volúmenes deben ser diligenciados en la tabla de atributos del archivo “UnidadesModelación” relacionado en la tabla 47 (sección 4.1.), adicionando un campo donde se encuentre el volumen de sedimentos definido a partir de la caracterización de avenidas torrenciales en campo. La estimación de los volúmenes debe quedar sustentada en el capítulo de la caracterización de avenidas torrenciales como una sección, cuyo procedimiento consiste básicamente en subdivi-



dir el volumen estimado a lo largo de la zona de tránsito por las unidades de modelación.

8.1.4. Análisis de detonantes

El resultado principal del modelo propuesto es la hidrógrafa de creciente en unidades de $\left[\frac{m^3}{s}\right]$, generada para cada una de las unidades de modelación identificadas dentro del área de estudio en formato tabla en el archivo “SerieTempCaudal-Liquido” relacionado en la tabla 47. Las hidrógrafas formadas coincidirán con cada escenario propuesto, es decir, los periodos de retorno para los que están construidas las curvas IDF (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500).

8.1.5. Caracterización de la amenaza a escala 1:25 000

8.1.5.1. Volumen de sólidos a escala 1:25 000

El volumen de sólidos por deslizamientos, caídas de rocas y flujos estimados para el modelo espacial de estabilidad de taludes (figura 25, opción 1) se debe entregar en formato *raster* con el valor del volumen movilizado en cada celda del MDT con factores de seguridad iguales o inferiores a 1 para cada periodo de retorno. Este *raster* con los puntos inestables se entrega al modelo fluidodinámico para que los sólidos sean transportados hasta el cauce principal y sean incorporados como un volumen adicional al flujo. En caso de haberse estimado el volumen de sólidos a partir del modelo de relaciones de gradientes e información de campo (figura 25, opción 2), se entregarán los valores de caudal sólido para cada intervalo de tiempo, siguiendo la distribución de los hidrogramas de creciente para cada periodo de retorno en los puntos de cierre de las unidades de modelación, hasta completar la simulación fluidodinámica; esta información se entrega en la tabla “VolumenSolidos” y se involucra en el archivo “PuntosConcentracion”, relacionados en la tabla 47.

El resultado principal de la estimación de sólidos por erosión de laderas son los sedimentogramas en unidades de $\left[\frac{gramos}{s}\right]$ para cada una de las unidades de modelación generadas del área de estudio en formato tabla en el archivo “SerieTempCaudalSolido” relacionado en la tabla 47.

Los sedimentogramas formados coincidirán con cada escenario propuesto, es decir, los periodos de retorno para los que están construidas las curvas IDF (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500).

8.1.5.2. Modelación fluidodinámica a escala 1:25 000

Para cada escenario modelado se obtendrá un campo de velocidades y profundidades distribuidas en el espacio y en el tiempo, a partir de estos resultados se debe construir un *raster* de velocidades máximas y uno de profundidades máximas. Hay que recordar que se realiza una simulación por cada periodo de retorno propuesto (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años), esto dará como resultado ocho diferentes campos de velocidad y profundidad que variarán en el tiempo y en el espacio. Por tanto, se deben elaborar en total 16 *raster*: 8 de velocidad máxima —uno por cada periodo de retorno— y 8 de profundidad máxima —uno por cada periodo de retorno— (figura 32).

8.1.5.3. Cuantificación de la amenaza a escala 1:25 000

Con la información de alturas y velocidades obtenidas de la modelación fluidodinámica se genera el *raster* de índice de intensidad de flujo combinado para toda la zona de estudio; este se integra con el archivo “D90_D50_Dmax” relacionado en la tabla 47 para obtener un archivo de amenaza 25k, en que se debe especificar la categoría de amenaza (alta, media o baja) y se deben generar polígonos de las zonas de amenaza media y alta que servirán como insumo de la definición de zonas a detallar (archivo “ZonasEvaluacion2k” relacionado en la tabla 47), donde se realizarán levantamientos topobatómicos, con el propósito de ser insumos de la modelación detallada para el cálculo cuantitativo de la amenaza a escala 1:2000. El resultado se entrega en el archivo “AmenazaAvT_25k” y debe contar con la categorización y las características de cada categoría.

8.1.5.4. Integración con la geomorfología indicativa

El archivo “AmenazaAvT_25k” se debe complementar con el archivo “SusceptibilidadGeomor-

fologica” y recategorizar para generar el principal producto de la integración, que es el archivo “AmenazaAvT_25k” re-categorizado, relacionado en la tabla 47, que debe contener la zonificación final de la amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25 000. Este también debe incluir, a manera de rasgos, los puntos de interés como los sitios donde se pueden presentar represamientos, erosión lateral, avulsiones o cambios importantes de dirección, velocidad y/o descarga.

8.1.6. Caracterización de la amenaza a escala 1:2000

8.1.6.1. Caracterización de avenidas torrenciales

Este producto corresponde al archivo “EventosRecientes” relacionado en la tabla 47 y debe contener la cartografía de los eventos recientes (<500 años) presentes en la zona de estudio a escala 1:2000, cuya estructura debe ser similar al producto “InventarioAvT” resultante a escala 1:25 000. Esa cartografía debe estar soportada con la caracterización de los depósitos y la correlación de facies encontradas en la exploración del subsuelo hecha mediante trincheras o apiques. Para ello también se debe tener en cuenta la información levantada a escala 1:25 000 en la zona de estudio a escala 1:2000.

8.1.6.2. Volumen de sólidos a escala 1:2000

La estimación de sólidos provenientes de inestabilidades debido a socavación lateral procede del análisis de estabilidad de laderas y bloque colgante (*cantilever*) en cada polígono de erosión fluvial establecido a lo largo del cauce principal. El valor del volumen cuantificado debe ser incorporado en el archivo “ZonasEvaluacion2k”, relacionado en la tabla 47, como aporte puntual en cada polígono de erosión para ser incorporado en la simulación fluidodinámica a escala 1:2000. Adicionalmente, los volúmenes de sólidos de aporte por deslizamientos, caídas de rocas y flujos en la escala 1:25 000 también deberán incluirse en esta etapa.

8.1.6.3. Modelación fluidodinámica a escala 1:2000

Para cada escenario modelado se obtendrá un campo de velocidades y profundidad distribuida en el espacio y en el tiempo, a partir de estos resultados se debe construir un *raster* de velocidades máximas y uno de profundidades máximas.

Es pertinente recordar que se realiza una simulación por cada periodo de retorno propuesto (2,33; 5; 10; 25; 50; 100; 300, y 500 años), esto dará como resultado 8 diferentes campos de velocidad y profundidad que variaran en el tiempo y en el espacio. Por tanto, se deben elaborar en total 16 *raster*: 8 de velocidad máxima —uno por cada periodo de retorno— y 8 de profundidad máxima —uno por cada periodo de retorno— (figura 32).

8.1.6.4. Cuantificación de la amenaza a escala 1:2000

Con la información de alturas y velocidades obtenidas de la modelación fluidodinámica se genera un *raster* de índice de intensidad de flujo para cada periodo de retorno y se obtiene la curva de amenaza en cada pixel. El producto principal de esta etapa de análisis es el archivo “AmenazaAvT_2k”, relacionado en la tabla 47, que debe contener las categorías de amenaza que brinden una idea general de las características de los flujos que potencialmente afectarían una región determinada. Luego, la zonificación obtenida será comparada con la zonificación geomorfológica mediante una matriz de confusión, momento en el cual la cartografía generada para el nivel de amenaza estará sujeta a ajustes procedentes de dicho análisis.

8.1.6.5. Integración con los depósitos recientes

El archivo “AmenazaAvT_2k” se debe complementar con el archivo “EventosRecientes”. En caso de que se hayan identificado falsos negativos al comparar la cartografía de los eventos con la amenaza a escala 1:2000, estos deben ser rasterizados, clasificados e integrados a la amenaza como está descrito en la sección 6.4. El principal producto

de la integración que es el archivo “AmenazaAv-T_2k” recategorizado, relacionado en la tabla 47, debe contener la zonificación final de la amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:2000 complementada con los falsos negativos categorizados según los eventos que les dieron origen.

8.2. Perfil de los profesionales

Para la aplicación de esta metodología es necesario contar con el conocimiento y experiencia de geólogos o ingenieros geólogos para el desarrollo de la caracterización de avenidas torrenciales; ingenieros catastrales y geodestas, ingenieros geógrafos, ingenieros topográficos, topógrafos, ingenieros civiles o afines especializados en sistemas de información geográfica para el ajuste y verificación de modelos digitales de elevación;

ingenieros hidrólogos, ambientales, agrícolas, civiles o afines especializados en hidrología para el análisis de la precipitación como detonante y para la estimación de sólidos provenientes de erosión de laderas; ingenieros geotecnistas, civiles o afines especializados en geotecnia para la estimación de sólidos provenientes de deslizamientos, caídas de rocas, flujos e inestabilidades debidas a socavación lateral del cauce; ingenieros hidráulicos, civiles, agrícolas, ambientales o afines especializados en fluidodinámica para la simulación del transporte, arrastre y depósito de los escenarios de avenida torrencial; e ingenieros civiles o afines con experiencia en evaluación de amenaza para la cuantificación de amenaza en los diferentes niveles de detalle. En caso de evidencia de condiciones que favorezcan la ocurrencia de escenarios de represamiento por detritos leñosos, se requieren ingenieros forestales.





Quebrada Cardosena
San Eduardo, Boyacá, 2019
Fotografía de Carlos Alberto Quintero

Referencias

- Abbe, T., Montgomery, D. y Brooks, A. (2003). Wood in River Rehabilitation and Management. En *The ecology and management of wood in world rivers*. American Fisheries Society.
- Acosta Castellanos, P. M. (2017). *Estimación de curvas intensidad, duración y frecuencia (idf) en puntos geográficos sin registro históricos de precipitación* [Tesis de maestría]. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/19947>
- American Society for Testing and Materials International (ASTM). (2000). *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. <https://doi.org/10.1520/D2487-00>
- American Society of Civil Engineers. (1996). *Hydrology Handbook*. <https://doi.org/10.1061/9780784401385>
- Andreoli, A., Comiti, F. y Lenzi, M. A. (2007). Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(11), 1675-1692. <https://doi.org/10.1002/ESP.1593>
- Armanini, A. (1997). On the dynamic impact of debris flows (pp. 208-226). En A. Armanini y M. Michiue M. (eds). *Recent Developments on Debris Flows*. Lecture Notes in Earth Sciences, vol 64. Springer. <https://doi.org/10.1007/BFB0117770>
- Armenta, G. E. y Ruiz, F. (2010). *Indicadores de eventos extremos en los escenarios de cambio climático para el periodo 2011-2040*. Ideam.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2015). *Norma colombiana de diseño de puentes CCP14*. Invias.
- Ávila, G. E., Cubillos, C. E., Granados, A. E., Medina, E., Rodríguez, É. A., Rodríguez, C. E. y Ruiz, G. L. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano.
- Baecher, G. y Christian, J. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Wiley.
- Benvenuti, M. y Martini, I. P. (2009). Analysis of Terrestrial Hyperconcentrated Flows and their Deposits. En I. P. Martini, V. R. Baker y G. Garzón, (eds.). *Flood and Megaflood Processes and Deposits: Recent and Ancient Examples*. International Association of Sedimentologists. <https://doi.org/10.1002/9781444304299.ch10>
- Berti, M., Genevois, R., Simoni, A. y Tecca, P. R. (1999). Field observations of a debris flow event in the Dolomites. *Geomorphology*, 29(3-4). [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00018-5)
- Birkeland, P. W. (1984). *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press.
- Blahut, J., van Westen, C. J. y Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, 119(1-2), 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.017>
- Boggs, S. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Pearson.
- Bordy, E. M., Head, H. y Runds, M. J. (2016). Palaeoenvironment and provenance in the early Cape Basin of southwest Gondwana: sedimentology of the Lower Ordovician Piekenierskloof Formation, Cape Supergroup, South Africa. *South African Journal of Geology*, 119(2), 399-414. <https://doi.org/10.2113/gssajg.119.2.399>
- Bowman, D. (2019). *Principles of Alluvial Fan Morphology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1558-2>
- Bowman, S. D. y Lund, W. R. (2016). *Guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering-geology reports, with a suggested approach to geologic-hazard ordinances in Utah*. Utah Geological Survey [General Technical Report (GTR)]. U. S. Forest Service. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-74>
- Bunte, K. y Abt, S. R. (2001). *Sampling Surface and Sub-surface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel-*

- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring.*
- Bunte, K., Abt, S. R., Potyondy, J. P. y Swingle, K. W. (2009). Comparison of Three Pebble Count Protocols (EMAP, PIBO, and SFT) in Two Mountain Gravel-Bed Streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(5), 1209-1227. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00355.x>
- Burgos, V. y Salcedo, A. (2014, octubre 9-10). *Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información*. 3° Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Buenos Aires, Argentina.
- Busnelli, J. y Horta, L. R. (2014). Morfometría de cuencas montañas y metamorfosis fluvial (Tucumán-Argentina). *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 71(1), 11-20.
- Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 62(1/2), 23-27. <https://doi.org/10.2307/520449>
- Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., López de Armentia, A., del Río, J. L. y de Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73-97.
- Casagli, N. y Ermini, L. (1999). Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 20(3), 219-250.
- Casagli, N., Dapporto, S., Ibsen, M. L., Tofani, V., & Vannocci, P. (2005). Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20th–21st November 2000, in Northern Tuscany. *Landslides*, 3, 13-21. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0007-y>
- CDPHE. (2009). *Standard Operating Procedure for the Collection of Pebble Counts*. https://www.colorado.gov/pacific/sites/default/files/WQ_NonpointSource-SOP-Collection-of-Pebble-Counts-051215.pdf
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P. y Voltz, M. (2005). Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 191-214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.009>
- Chen, C. Y. y Yu, F. C. (2011). Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology*, 129(3-4), 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.002>
- Cheng, W., Wang, N., Zhao, M. y Zhao, S. (2016). Relative tectonics and debris flow hazards in the Beijing mountain area from DEM-derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geomorphology*, 257, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.003>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W. y Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Cílek, V., Bárta, M., Lisá, L., Pokorná, A., Juříčková, L., Brůna, V., Mahmoud, A. M. A., Bajer, A., Novák, J. y Beneš, J. (2012). Diachronic development of the Lake of Abusir during the third millennium BC, Cairo, Egypt. *Quaternary International*, 266, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.12.025>
- Coe, J. A., Bessette-Kirton, E. K., Slaughter, S. L., Rengers, F. K., Contreras, T. A., Mickelson, K. A., Taylor, E. M., Kean, J. W., Jacobacci, K. E. y Hanson, M. A. (2019). A 4000-year history of debris flows in north-central Washington State, U.S.A.: Preliminary results from trenching and surficial geologic mapping at the Pope Creek fan. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment - Proceedings of the 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*.
- Coe, J. A., Michael, J., Crovelli, R. y Savage, W. (2000). *Preliminary map showing landslide densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records, Seattle, Washington*. Open-File Report 00-303. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr00303>
- Command, N. F. E. (1986). *Soil mechanics: Design Manual 7.01*. <https://www.iberlibro.com/SOIL-MECHANICS-Design-Manual-7.01-Revalidated/22682406490/bd>
- Cordova, J. M., Rosi-Marshall, E. J., Yamamuro, A. M. y Lamberti, G. A. (2007). Quantity, controls and functions of large woody debris in Midwestern USA streams. *River Research and Applications*, 23(1), 21-33. <https://doi.org/10.1002/RRA.963>
- Costa, J. y Schuster, R. (1988). *The formation and failure of natural dams*. Open-File Report 87-392. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr87392>
- Coussot, P. y Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3-4), 209-227. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)
- Caspers, H. (1986). S. Dyck und G. Peschke: Grundlagen der Hydrologie.—386 S. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1983. Bestell-Nr. 5621089. 35,—M.

- Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 71(1), 149-149. <https://doi.org/10.1002/iroh.19860710130>
- Crovelli, R. A. (2000). *Probability models for estimation of number and costs of landslides*. Open-File Report 2000-249. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr00249>.
- Cui, P., Zhou, G. G. D., Zhu, X. H. y Zhang, J. Q. (2013). Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures. *Geomorphology*, 182, 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.009>
- Cui, Peng, Zeng, C. y Lei, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1644-1655. <https://doi.org/10.1002/esp.3744>
- Cumbe Loaiza, L. C. y Roncancio Espinosa, A. C. (2017). *Análisis de la eficacia y del comportamiento de los errores en posición presentes en la generación de modelos digitales de elevación con software fotogramétrico libre y comercial, para una zona de la ciudad de Bogotá D.C* [Tesis de pregrado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- D'Agostino, V. (1996). Análisis cuantitativa e cualitativa del transporte sólido torrentizoso en los bacinos montañosos del Trentino Oriental. *Associazione Italiana Di Ingegneria Agraria*, 1.
- Dal Sasso, S. F., Sole, A., Pascale, S., Sdao, F., Bateman, A. y Medina, V. (2014). Assessment methodology for the prediction of landslide dam hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(3), 557-567. <https://doi.org/10.5194/NHESS-14-557-2014>
- Daniels, M. y Rhoads, B. (2003). Influence of a Large Woody Debris Obstruction on Three-dimensional Flow Structure in a Meander Bend. *Geomorphology*, 51(1-3), 159-173. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00334-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00334-3)
- Darby, S., Rinaldi, M. y Dapporto, S. (2007). Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3). <https://doi.org/10.1029/2006JF000722>
- De Hass, T. y van Woerkom, T. (2016). Bed scour by debris flows: experimental investigation of effects of debris-flow composition. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(13), 1951-1966. <https://doi.org/10.1002/esp.3963>
- De Scally, F. Owens, I. y Louis, J. (2010). Controls on fan depositional processes in the schist ranges of the Southern Alps, New Zealand, and implications for debris-flow hazard assessment. *Geomorphology*, 122(1-2), 99-116. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.002>
- De Scally, F. y Owens, I. (2004). Morphometric controls and geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(3), 311-322. <https://doi.org/10.1002/esp.1022>
- Del Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S. y Casagli, N. (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238-246. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.02.008>
- Dorn, H., Vetter, M. y Höfle, B. (2014). GIS-based roughness derivation for flood simulations: A comparison of orthophotos, LiDAR and Crowdsourced Geodata. *Remote Sensing*, 6(2), 1739-1759. <https://doi.org/10.3390/rs6021739>
- Dufresne, A., Ostermann, M. y Preusser, F. (2018). River-damming, late-Quaternary rockslides in the Ötztal Valley region (Tyrol, Austria). *Geomorphology*, 310, 153-167. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.012>
- Elkadiri, R., Sultan, M., Youssef, A. M., Elbayoumi, T., Chase, R., Bulkhi, A. B. y Al-Katheeri, M. M. (2014). A Remote Sensing-Based Approach for Debris-Flow Susceptibility Assessment Using Artificial Neural Networks and Logistic Regression Modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(12), 4818-4835. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2337273>
- England, J. F., Salas, J. D. y Jarrett, R. D. (2003). Comparisons of two moments-based estimators that utilize historical and paleoflood data for the log Pearson type III distribution. *Water Resources Research*, 39(9). <https://doi.org/10.1029/2002WR001791>
- Ermini, L. (2003). *Gli sbarramenti d'alveo da frane: Criteri speditivi per la stesura di scenari evolutivi derivanti dalla loro formazione*. AIGA - 1° Convegno Nazionale.
- Ermini, L. y Casagli, N. (2003). Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(1), 31-47. <https://doi.org/10.1002/ESP.424>
- Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. <https://doi.org/10.1002/esp.3963>

- www.academia.edu/35199035/Modelos_digitales_de_elevaci%C3%B3n_Teor%C3%ADa_m%C3%A9todos_de_interpolaci%C3%B3n_y_aplicaciones
- Fan, X., Dufresne, A., Siva Subramanian, S., Strom, A., Hermanns, R., Tacconi, C., Hewitt, K., Yunus, A. P., Dunning, S., Capra, L., Geertsema, M., Miller, B., Casagli, N., Jansen, J. D. y Xu, Q. (2020). The formation and impact of landslide dams – State of the art. *Earth-Science Reviews*, 203, 103116. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103116>
- Flórez Gálvez, J. H. y Bolaños Mora, A. (eds.). (2009). *Manual de drenaje para carreteras 2009*. Instituto Nacional de Vías (Invias).
- Fuentes Junco, J. J. A. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro*. Instituto Nacional de Ecología (INE). https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/morfometria_pico_tancitaro.pdf
- Gabet, E. J. y Dunne, T. (2003). Sediment detachment by rain power. *Water Resources Research*, 39(1), ESG 1-1-ESG 1-12. <https://doi.org/10.1029/2001wr000656>
- García-Delgado, H., Machuca, S. y Medina, E. (2019). Dynamic and geomorphic characterizations of the Mocoa debris flow (March 31, 2017, Putumayo Department, southern Colombia). *Landslides*, 16(3), 597-609. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-01121-3>
- García-Delgado, H., Machuca, S., Velandia, F. y Audemard, F. (2020). Along-strike variations in recent tectonic activity in the Santander Massif: New insights on landscape evolution in the Northern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102472. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102472>
- García-Delgado, H., Villamizar-Escalante, N. y Bernet, M. (2019). Recent tectonic activity along the Bucaramanga Fault System (Chicamocha River Canyon, Eastern Cordillera of Colombia): a geomorphological approach. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 62(3), 199-215. <https://doi.org/10.1127/zfg/2019/0630>
- Gemitzi, A. y Christou, O. (2013). LAN Tool: A GIS Tool for the Improvement of Digital Elevation Models Using Drainage Network Attributes. *Journal of Geographic Information System*, 5(4), 325-336. <https://doi.org/10.4236/jgis.2013.54031>
- Gil, E. G. y Tobón, C. (2016). Hydrological modelling with TOPMODEL of chingaza páramo, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7919-7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Giraldo Osorio, J. D. (2018, septiembre 18-21). Construcción de curvas IDF para Colombia utilizando información de la base de datos de precipitación chirps. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. https://www.ina.gov.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_70.pdf
- Giraldo Osorio, J. D. y Trujillo Osorio, D. E. (2018). *Aportes a la caracterización estadística de sequías meteorológicas en el territorio colombiano*. Pontificia Universidad Javeiana.
- Giraldo Osorio, J. D., Díaz Granados, M. y Camacho, L. (2005). Modelo distribuido de transito de crecientes en cuencas - MDTCC. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 12, 91-102.
- Gómez, S. (2019). *Aplicabilidad del método del Índice de Susceptibilidad Compuesto para la identificación de cuencas susceptibles a la ocurrencia de flujos torrenciales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gomi, T., Sidle, R., Bryant, M. y Woodsmith, R. (2001). The characteristics of woody debris and sediment distribution in headwater streams, southeastern Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(8), 1386-1399. <https://doi.org/10.1139/X01-070>
- González, A., Temimi, M. y Khanbilvardi, R. (2015). Adjustment to the curve number (NRCS-CN) to account for the vegetation effect on hydrological processes. *Hydrological Sciences Journal*, 60(4), 591-605. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.898119>
- Goodrich, D. C., Burns, I. S., Unkrich, C. L., Semmens, D. J., Guertin, D. P., Hernández, M., Yatheedradas, S., Kennedy, J. R. y Levick, L. R. (2012). Kineros2/Agwa: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1561-1574. <https://doi.org/10.13031/2013.42264>
- Graf, K., Viel, V., Carlier, B., Lissak, C., Madelin, M., Arnaud-Fassetta, G. y Fort, M. (2018). Tracing sedimentary mobilization from debris lows in the Peyronnelle watershed (Queyras, Southern French Alps). *Geomorphologie: Relief, Processus, Environment*, 24(1), 43-57. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11967>
- Griffis, V. W., Stedinger, J. R. y Cohn, T. A. (2004). Log Pearson type 3 quantile estimators with regional skew information and low outlier adjustments. *Water Resources Research*, 40(7). <https://doi.org/10.1029/2003WR002697>
- Haan, C. T., Barfield, B. J. y Hayes, J. C. (Eds.). (1994). Copyright. En *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments* (p. iv). Academic Press.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057164-5.50002-5>
- Hack, J. T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 1(4), 421-429.
- Hamdouni, R. El, Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J. y Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>
- Hamdouni, R. El, Irigaray, C., Jiménez-Perálvarez, J. y Chacón, J. (2010). Correlations analysis between landslides and stream length-gradient (SL) index in the southern slopes of Sierra Nevada (Granada, Spain). *RNM 121 Group of Environmental Researches: Geological Hazards and Terrain Engineering*.
- Harrelson, C., Rawlins, C. L. y Potyondy, J. P. (1994). *Stream channel reference sites: An illustrated guide to field technique*. General Technical Report (GTR) 245. U. S. Forest Service. <https://doi.org/10.2737/RM-GTR-245>
- He, S., Liu, W. y Li, X. (2016). Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles. *Environmental Earth Sciences*, 75(4). <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5180-2>
- Hermanns, R. L., Hewitt, K., Strom, A., Evans, S. G., Dunning, S. A. y Scarascia-Mugnozza, G. (2011). *The Classification of Rockslide Dams*. In: S. Evans, R. Hermanns, A. Strom y G. Scarascia-Mugnozza (eds.) *Natural and Artificial Rockslide Dams. Lecture Notes in Earth Sciences*, vol 133. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_24
- Herschel, W. H. y Bulkley, R. (1926). Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid-Zeitschrift*, 39(4), 291-300. <https://doi.org/10.1007/BF01432034>
- Hervouet, J. M. (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470319628>
- Highland, L. M. y Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook: The Guide to Understanding Landslides*. U.S. Geological Survey.
- Hoek, E. y Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC Press.
- Horritt, M. S. y Bates, P. D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, 253(1-4), 239-249. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00490-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00490-5)
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:E-DOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:E-DOSAT]2.0.CO;2)
- Hossain, A. K. M. A., Jia, Y. y Chao, X. (2009). Estimation of Manning's roughness coefficient distribution for hydrodynamic model using remotely sensed land cover features. *2009 17th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2009*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/Geoinformatics.2009.5293484>
- Hough, B. K. (1969). *Basic soils engineering*. John Wiley & Sons.
- Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hungr, O., Morgan, G. C. y Kellerhals, R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(4). <https://doi.org/10.1139/t84-073>
- Ideam. (2020). *DHIME - Datos Hidrológicos y Meteorológicos*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2016). *Catálogo de representación cartografía básica digital IGAC escala 1:1000*. https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/catalogo_representacion_1k_v1.0.pdf
- Irigaray, C. y Chacón, J. (2002). Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante S.I.G. En F. J. Ayala-Carcedo y J. Corominas (eds.). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con la técnica SIG. Fundamentos y aplicaciones en España* (pp. 21-36). Instituto Geológico y Minero de España.
- Iroumé, A., Mao, L., Andreoli, A., Ulloa, H. y Ardiles, M. P. (2015). Large wood mobility processes in low-order Chilean river channels. *Geomorphology*, 228, 681-693. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2014.10.025>
- Iverson, R. M., Reid, M. E. y LaHusen, R. G. (1997). Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 85-138. <https://doi.org/10.1146/Annurev.earth.25.1.85>

- Jakob, M. y Hungr, O. (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b138657>
- Jakob, M., Stein, D. y Ulmi, M. (2012). Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards*, 60(2), 241-261. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0007-2>
- Jitousono, T., Shimokawa, E. y Tsuchiya, S. (1996). Debris pyroclastic flow following flows the 1984 eruption volcano, with in Merapi Indonesia. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 48(Special Issue), 101-107. https://doi.org/10.11475/sabo1973.48.Special_101
- Johnson, A. y Rodine, J. (1984). *Debris flow*. En D. Brunsten y D. B. Prior (eds.). *Slope Instability*. Wiley.
- Johnson, K. A. y Sitar, N. (1990). Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(6), 789-801. <https://doi.org/10.1139/t90-092>
- Johnson, P. A. y McCuen, R. H. (1996). *Mud and Debris Flows*. In: V. P. Singh (ed.). *Hydrology of Disasters*. Water Science and Technology Library, vol 24. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8680-1_7
- Johnson, P. A., McCuen, R. H. y Hromadka, T. V. (1991). Magnitude and frequency of debris flows. *Journal of Hydrology*, 123(1-2), 69-82. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90069-T](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90069-T)
- Julian, J. P. y Torres, R. (2006). Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology*, 76(1-2), 193-206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.11.003>
- Julien, P. Y. y Lan, Y. (1991). Rheology of Hyperconcentrations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(3), 346-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:3\(346\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:3(346))
- Kain, C. L., Rigby, E. H. y Mazengarb, C. (2018). A combined morphometric, sedimentary, GIS and modelling analysis of flooding and debris flow hazard on a composite alluvial fan, Caveside, Tasmania. *Sedimentary Geology*, 364, 286-301. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.10.005>
- Keller, E. y Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, uplift and landscape*. Pearson Education.
- Kerr Wood Leidal Associates Limited. (2004). *Jones Creek Debris Flow Study*. <https://www.whatcom-county.us/DocumentCenter/View/11552/Jones-Creek-PDF?bidId=>
- Khan, M. A., Haneef, M., Khan, A. S. y Tahirkheli, T. (2013). Debris-flow hazards on tributary junction fans, Chitral, Hindu Kush Range, northern Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 720-733. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2012.11.025>
- Kim, S. B., Blair, T. C. y McPherson, J. G. (1995). Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research*, 65(4a), 706-711. <https://doi.org/10.1306/d42681b2-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Kin, A. G. y Ledent, J. F. (1996). *Efectos del viento sobre las plantas*. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_viento__4.pdf
- Knott, J. R. y Sarna-Wojcicki, A. M. (2001). Late Pliocene tephrostratigraphy and geomorphic development of the Artists Drive structural block. En M. N. Machette, M. L. Johnson y J. L. Slate (eds.). *Quaternary and Late Pliocene Geology of the Death Valley Region: Recent Observations on Tectonics, Stratigraphy, and Lake Cycles (Guidebook for the 2001 Pacific Cell — Friends of the Pleistocene Fieldtrip)*. U.S. Geological Survey.
- Kochel, R. C. (1987). Holocene debris flows in central Virginia. En J. E. Costa y G. F. Wieczorek (eds.). *Debris Flows/Avalanches. GSA Reviews in Engineering Geology* (139-155), vol. 7, 139-155. <https://doi.org/10.1130/REG7-p139>
- Korup, O. (2004). Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams. *Engineering Geology*, 73(1-2), 13-35. <https://doi.org/10.1016/j.ENGGE0.2003.11.003>
- Kothiyari, G. C. y Luirei, K. (2016). Late Quaternary tectonic landforms and fluvial aggradation in the Saryu River valley: Central Kumaun Himalaya. *Geomorphology*, 268, 159-176. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.010>
- Koukouvelas, I. K., Zygouri, V., Nikolakopoulos, K. y Verroios, S. (2018). Treatise on the tectonic geomorphology of active faults: The significance of using a universal digital elevation model. *Journal of Structural Geology*, 116, 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.06.007>
- Kundu, P. y Cohen, I. (2002). *Fluid Mechanics*. Academic Press.
- Lancaster, J. T., Spittler, T. E. y Short, W. R. (2012). Using Digital Geologic Maps to Assess Alluvial-Fan Flood Hazards. En D. R. Soller (ed.). *Digital Ma-*

- pping Techniques '10—Workshop Proceedings, Sacramento, California, May 16-19, 2010. Open-File Report 2012-1171. U.S. Geological Survey.
- Lavigne, F. y Suwa, H. (2004). Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology*, 61(1-2), 41-58. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.11.005>
- Leitão, J. P. y de Sousa, L. M. (2018). Towards the optimal fusion of high-resolution Digital Elevation Models for detailed urban flood assessment. *Journal of Hydrology*, 561, 651-661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.043>
- Lema Tapias, Á. (1979). *Introducción a la dasometría*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2111>
- Li, Z., Zhu, Q. y Gold, C. (2006). Digital Terrain. En *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-2460-6_7
- Liang, Y. y Xiong, F. (2019). Quantification of debris flow vulnerability of typical bridge substructure based on impact force simulation. *Geomatics Natural Hazard and Risk*, 10(1), 1839-1862. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1641564>
- Lim, K. J., Engel, B. A., Muthukrishnan, S. y Harbor, J. (2006). Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using CN technology. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 629-643. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481.x>
- Liu, C. an, Chen, Z.-x., Shao, Y., Chen, J.-s., Hasi, T. y Pan, H.-z. (2019). Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 506-525. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62016-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62016-7)
- Loehr, J. E., Lutenegger, A., Rosenblad, B. y Boeckmann, A. (2017). Geotechnical Site Characterization. *Geotechnical Engineering Circular No. 5, FHWA NHI-16-072*.
- López Bermúdez, F. y Romero Díaz, M. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Gualquivir. *Papeles de Geografía*, 12, 47-62.
- López, X., Valvatne, P. H. y Blunt, M. J. (2003). Predictive network modeling of single-phase non-Newtonian flow in porous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, 264(1), 256-265. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00310-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00310-2)
- Major, J. J. y Pierson, T. (1992). Debris Flow Rheology: Experimental Analysis of Fine-Grained Slurries. *Water Resources Research*, 28(3), 841-857. <https://doi.org/10.1029/91WR02834>
- Marchelli, M., Pirulli, M., Scavia, C. y Rosatti, G. (2016). TRENT2D, a quasi-two-phase numerical code to simulate debris flow dynamics. En *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. CRC Press.
- Marriott, M. J., Shields Jr., F. D. y Gippel, C. J. (1996). Discussion and Closure: Prediction of Effects of Woody Debris Removal on Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(8), 471-472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:8\(471\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:8(471))
- Mazzorana, B., Zischg, A., Largiader, A. y Hübl, J. (2009). Hazard index maps for woody material recruitment and transport in alpine catchments. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(1), 197-209. <https://doi.org/10.5194/NHESS-9-197-2009>
- Medina, V., Hürlimann, M. y Bateman, A. (2008). Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5(1), 127-142. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0102-3>
- Mena-Palacios, M. F., Palomino-Lemus, R., Toro-Ortiz, Y. M., Córdoba-Machado, S. y Murillo-López, W. (2016). Analysis of the extreme indices of precipitation in Colombia and its relationship with the ENSO phenomenon. *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó Investigación Biodiversidad y Desarrollo*, 35(1), 31-44. <https://doi.org/10.18636/riutch.v35i1.814>
- Méndez, W. y Marcucci, E. (2005). Análisis morfométrico de la microcuenca de la quebrada Curucutí, estado Vargas-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 47(1), 29-55.
- Méndez, W., González, Z., Suárez, J., Maraisa, A., Vielma, M. y Maiz, H. (2016). Geomorfología de los abanicos aluviales del piedemonte norte del macizo El Ávila, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 40(87), 95-128.
- Meza Aliaga, M., Rodríguez Valdivia, A., Corvacho Ganahín, O. y Tapia Tosetti, A. (2014). Análisis Morfométrico De Microcuencas Afectadas Por Flujos De Detritos Bajo Precipitación Intensa En La Quebrada De Camiña, Norte Grande De Chile. *Diálogo Andino*, 44, 15-24. <https://doi.org/10.4067/s0719-26812014000200003>

- Meza, M., Rodríguez Valdivia, A., Corvacho Ganañín, O. y Tapia Tosetti, A. (2014). Análisis Morfométrico De Microcuencas Afectadas Por Flujos De Detritos Bajo Precipitación Intensa En La Quebrada De Camiña, Norte Grande De Chile. *Diálogo Andino*, 44, 15-24. <https://doi.org/10.4067/s0719-26812014000200003>
- Miall, A. (2014). *Fluvial Depositional Systems*. Springer International Publishing Switzerland.
- Midgley, T., Fox, G. y Heeren, D. (2012). Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Geomorphology*, 145-146, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.044>
- Miller, B., Dufresne, A., Geertsema, M., Atkinson, N., Evensen, H. y Cruden, D. (2018). Longevity of dams from landslides with sub-channel rupture surfaces, Peace River region, Canada. *Geoenvironmental Disasters*, 5(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/S40677-017-0090-0>
- Millet, D. (2011). *River erosion, landslides and slope development in Göta River*. A study based on bathymetric data and general limit equilibrium slope stability analysis. Chalmers University of Technology. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/149365.pdf>
- Mizuyama, T., Kobashi, S. y Ou, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. *Internationales Symposion Interpraevent*.
- Monsalve, J. J. M. (2009). Marco histórico y estado del arte de los modelos de evolución del paisaje y de erosión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15 Sup. 1), 47-57.
- Naaim, M., Larcher, M. y Rheinberger, C. (2009). *Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements - Irasmos*. <https://iramos.slf.ch/>
- Naciones Unidas. (1992). *Glosario multilingüe de términos convenidos internacionalmente relativos a la gestión de desastres*.
- Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P. y W McArdeell, B. (2006). Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(1), 155-165. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-155-2006>
- Nasmith, H. W. y Mercer, A. G. (1979). Design of dykes to protect against debris flows at Port Alice, British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(4), 748-757. <https://doi.org/10.1139/T79-082>
- Navas Izquierdo, A. (1991). Modelización matemática de la escorrentía y erosión en cuencas: el modelo ANSWERS. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei* 21, 20(3-4), 29-40.
- Nemec, W. (2009, septiembre 20-23). What is a hyperconcentrated flow? *IAS Meeting, 2009*.
- Nicholas, A. y Walling, D. (1997). Modelling flood hydraulics and overbank deposition on river floodplains. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(1), 59-77. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199701\)22:1<59::AID-ESP652>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199701)22:1<59::AID-ESP652>3.0.CO;2-R)
- O'Brien, J. y Julien, P. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8), 877-887. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(877\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877))
- Oguchi, C. (2013). Weatherin Rinds: Formation Processes and Weathering Rates. En *Treatise on Geomorphology*, vol. 4. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00067-1>
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*.
- Ouellet, M. y Germain, D. (2010). Hyperconcentrated Flow and Associated Risk: A Hydrogeomorphological Analysis of a Forested Alluvial Fan, Northern Gaspé Peninsula, Quebec. *Trees and Dynamics Conference*, Clermont-Ferrand, France.
- Ouellet, M. y Germain, D. (2014). Hyperconcentrated flows on a forested alluvial fan of eastern Canada: Geomorphic characteristics, return period, and triggering scenarios. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(14), 1876-1887. <https://doi.org/10.1002/esp.3581>
- Oviedo Torres, B. E. y León Aristizábal, G. (2010). *Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Pabón Caicedo, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139), 261-278.
- Palmer, R. S. (1965). Waterdrop Impact Forces. *Transactions of the ASAE*, 8(1), 69-70. <https://doi.org/10.13031/2013.40429>

- Peng, J., Fan, Z., Wu, D., Zhuang, J., Dai, F., Chen, W. y Zhao, C. (2015). *Heavy rainfall triggered loess – mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China. Engineering Geology*, 186, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.015>
- Pérez, J. V., Azor, A., Azañón, J. M. y Keller, E. A. (2010). Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, 119(1-2), 74-87. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.020>
- Piacentini, D., Troiani, F., Servizi, T., Nesci, O. y Veneri, F. (2020). SLiX: A GIS Toolbox to Support Along - Stream Knickzones Detection through the Computation and Mapping of the Stream Length - Gradient (SL) Index. *International Journal of Geo-Information*, 9(2), 69. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020069>
- Piani, C., Weedon, G. P., Best, M., Gomes, S. M., Viterbo, P., Hagemann, S. y Haerter, J. O. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395(3-4), 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.024>
- Pierson, T. (2005). *Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds*. USGS Fact Sheet 2004-3142. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/fs20043142>
- Piton, G. y Recking, A. (2016). Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II: Woody Debris. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001049)
- 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]. Univesitat Politècnica de Catalunya.
- Posada, E., Ramírez Daza, H. M. y Castro Díaz, I. R. (2010). Aplicaciones de la polarimetría de radar en observación de la Tierra. En *Experiencias en el uso y Aplicación de Tecnologías Satelitales para observación de la Tierra*. Comisión Colombiana del Espacio.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA). (2007). Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. *Publicación Geológica Multinacional*, (4). <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=AADCDB-356D9111BB2B5F69CA9A71DB2A>
- Pudasaini, S. P. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3), 1-28. <https://doi.org/10.1029/2011JF002186>
- Pudasaini, S. P. y Mergili, M. (2019). A multi-phase mass flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(12), 2920-2942. <https://doi.org/10.1029/2019JF005204>
- Quezada, J. y Jensen, A. (2010). Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology*, 37(1), 78-109. <https://doi.org/10.4067/S0718-71062010000100004>
- Ramírez Ramírez, K. M. (2018). *Etapas de crecimiento, incremento corriente anual e incremento medio anual de Prunus serotina Mcvaugh mediante dendrocronología, en los Distritos de Pilcomayo y Huamancaca Chico* [tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5282>
- Reis, D. S., Stedinger, J. R. y Martins, E. S. (2003). Bayesian GLS Regression with application to LP3 Regional Skew Estimation. *World Water and Environmental Resources Congress 2003*. [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)87](https://doi.org/10.1061/40685(2003)87)
- Revellino, P., Guadagno, F. y Hungr, O. (2008). Morphological methods and dynamic modelling in landslide hazard assessment of the Campania Apennine carbonate slope. *Landslides*, 5, 59-70. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0103-2>
- Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flow. *Natural Hazards*, 19, 47-77. <https://doi.org/10.1023/A:1008064220727>
- Robbins, C., Buck, B., Williams, A., Morton, J., House, P., Howell, M. y Yonovitz, M. (2008). Comparison of flood hazard assessments on desert piedmonts and playas: A case study in Ivanpah, Nevada. *Geomorphology*, 103(4), 520-532. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.07.020>
- Rodríguez, E. A., Sandoval, J. H., Chaparro, J. L., Trejos, G. A., Medina, E., Ramírez, K. C., Castro, E., Castro, J. A. y Ruiz, G. L. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25 000*. Servicio Geológico Colombiano.
- Rodríguez, S. E., Villarreal, E., Zamora, D., Figueroa, C., Villamizar, A., Fuquene, S., Fuentes, C. y Albornoz, L. (2016). *Estudio de actualización y análisis*

- comparativo de las curvas intensidad, duración y frecuencia disponibles en el Ideam.*
- Rogelis, M. C. y Werner, M. (2014). Regional debris flow susceptibility analysis in mountainous peri-urban areas through morphometric and land cover indicators. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), 3043-3064. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3043-2014>
- Rouaiguia, A. y Dahim, M. (2013). Numerical Modeling of Slope Stability Analysis. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 2(3), 533-542. [http://www.ijesit.com/Volume 2/Issue 3/IJESIT201303_73.pdf](http://www.ijesit.com/Volume%20Issue%3/IJESIT201303_73.pdf)
- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Ballesteros, J. A. y Bodoque, J. M. (2014). Large wood in rivers and its influence on flood hazard. *River Research and Applications*, 30(1), 81-97. <https://doi.org/10.1002/RRA.2614>
- Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A. y Zettler, T. E. (2002). *Geotechnical Engineering Circular N.o 5. Evaluation of soil and rock properties*. U.S. Department of Transportation.
- Samadi, A., Davoudi, M. H. y Amiri-Toka, E. (2011). Experimental Study of Cantilever Failure in the Upper Part of Cohesive Riverbanks. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(5), 444-460. <https://doi.org/10.3923/RJES.2011.444.460>
- Sánchez Rodríguez, L. (2004). *Aspectos prácticos de la adopción del marco geocéntrico nacional de referencia magna-sirgas como datum oficial de Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Santangelo, N., Daunis-i-Estadella, J., Crescenzo, G. Di, Donato, V. Di, Faillace, Martín-Fernández, J. A., Romano, P., Santo, A. y Scorpio, V. (2012). Topographic predictors of susceptibility to alluvial fan flooding, Southern Apennines. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(8), 803-817. <https://doi.org/10.1002/esp.3197>
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V. y Papini, M. (2014). Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. *Remote Sensing*, 6(10), 9600-9652. <https://doi.org/10.3390/rs6109600>
- Schneider, J. M., Rickenmann, D., Turowski, J. M. y Kirchner, J. W. (2015). Self-adjustment of stream bed roughness and flow velocity in a steep mountain channel. *Water Resources Research*, 51(10), 7838-7859. <https://doi.org/10.1002/2015WR016934>
- Schneuwly, M., Stoffel, M. y Rudolf, F. (2013). *Dating Torrential Processes on Fans and Cones. Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6>
- Shi, Z. H., Chen, L. D., Fang, N. F., Qin, D. F. y Cai, C. F. (2009). Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *Catena*, 77(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.11.006>
- Shingare, P. P. y Kale, S. S. (2013). Review on Digital Elevation Model. *International Journal of Modern Engineering Research*, 3(4), 2412-2418.
- Sihag, P., Tiwari, N. K. y Ranjan, S. (2017). Estimation and inter-comparison of infiltration models. *Water Science*, 31(1), 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.03.001>
- Silva Medina, G. (1987). Hidrología en cuencas pequeñas con información escasa. *Ingeniería e Investigación*, 16, 24-30.
- Skemer, N. A. y VanDine, D. F. (2005). Debris flows in history. En *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_3
- Smolczyk, U. (2003). *Geotechnical Engineering Handbook*. Ernst & Sohn. <https://es.scribd.com/document/404198582/Smolczyk-Ulrich-Eds-Geotechnical-Engineering-Handbook-Volumes-1-3-John-Wiley-Sons-2002>
- Sobota, D. J., Gregory, S. V. & Sickie, J. Van. (2006). Riparian tree fall directionality and modeling large wood recruitment to streams. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(5), 1243-1254. <https://doi.org/10.1139/X06-022>
- Sodnik, J., Podobnikar, T. y Mikoš, M. (2012). Using LiDAR data for debris flow modelling. *12th Congress interpraevent 2012. Grenoble, France*. https://www.researchgate.net/publication/257924564_Using_LiDAR_data_for_debris_flow_modelling
- Sohn, Y. K., Rhee, C. W. y Kim, B. C. (1999). Debris Flow and Hyperconcentrated Flood-Flow Deposits in an Alluvial Fan, Northwestern Part of the Cretaceous Yongdong Basin, Central Korea. *The Journal of Geology*, 107(1), 111-132. <https://doi.org/10.1086/314334>
- Soil Survey. (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.

- Staley, D. M., Wasklewicz, T. A. y Kean, J. W. (2014). Characterizing the primary material sources and dominant erosional processes for post-fire debris-flow initiation in a headwater basin using multi-temporal terrestrial laser scanning data. *Geomorphology*, 214, 324-338. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.015>
- Suwa, H., Okunishi, K. y Sakai, M. (1993). Motion, debris size and scale of debris flows in a valley on Mount Yakedake, Japan. *Sediment Problems. Proc. International Symposium, Yokohama*, 217, 239-248.
- Svensson, C. y Jones, D. A. (2010). Review of methods for deriving areal reduction factors. *Journal of Flood Risk Management*, 3(3), 232-245. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01075.x>
- Swanson, F., Oyagi, N. y Tominaga, M. (1986). Landslide Dams in Japan. En *Landslide Dams: Processes, Risk, and Mitigation*. American Society of Civil Engineers.
- Tacconi, C., Segoni, S., Casagli, N. y Catani, F. (2016). Geomorphic indexing of landslide dams evolution. *Engineering Geology*, 208, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.024>
- Tacconi, C., Vilímek, V., Emmer, A. y Catani, F. (2018). Morphological analysis and features of the landslide dams in the Cordillera Blanca, Peru. *Landslides*, 15(3), 507-521. <https://doi.org/10.1007/S10346-017-0888-6>
- Takahashi, T. (2014). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis Group.
- Tang, C., Rengers, N., Van Asch, T. W. J., Yang, Y. H. y Wang, G. F. (2011). Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu city, Gansu Province, northwestern China. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(11), 2903-2912. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2903-2011>
- Tardío, G. (2013). Metodología de integración del análisis de erosión de lecho y orillas con el análisis de estabilidad de taludes. Aplicaciones a la ingeniería y restauración fluvial. *Revista Montes*, 112, 14-19.
- Teutschbein, C. y Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456-457, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Theule, J. I., Liébault, F., Laigle, D., Loye, A. y Jaboyedoff, M. (2015). Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. *Geomorphology*, 243, 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.003>
- Troiani, F., Galve, J. P., Piacentini, D., Della, M. y Guerrero, J. (2014). Geomorphology Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: A case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, 214, 183-197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.004>
- Tsai, F., Hwang, J., Chen, L. y Lin, T. (2010). Post-disaster assessment of landslides in southern Taiwan after 2009 Typhoon Morakot using remote sensing and spatial analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 2179-2190. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2179-2010>
- Ulloa, H., Iroumé, A., Lenzi, M. A., Andreoli, A., Álvarez, C. y Barrera, V. (2010). Material leñoso de gran tamaño en dos cuencas de la Cordillera de la Costa de Chile con diferente historia de uso del suelo. *Bosque (Valdivia)*, 32(3), 235-245. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300005>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). (2018). *Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Multao, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, en el marco de las declaratorias de calamidad pública y desastre del Municipio de Mocoa - Putumayo, debidas al evento presentado el 31 de marzo de 2017*.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2017). Terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes. En *Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD*. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf;jsessionid=1ADDEE38CA-0713C6B15CC4D150169677?sequence=2>
- United States Geological Survey Water Supply. (2016). *Manning's n values for various land covers to use for dam breach analyses by NRCS in Kansas*. Recommendations and Cautions.
- Urrea, V., Ochoa, A. y Mesa, O. (2016, marzo). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014. *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.

- USGS. (2020). *What is a landslide and what causes one?* Disponible de https://www.usgs.gov/faqs/what-a-landslide-and-what-causes-one?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products
- Van der Sande, C. (2001). *River flood damage assessment using Ikonos imagery*. European Commission, Joint Research Centre, Space Applications Institute EGEO Unit, Natural Hazards Project.
- Vargas, M. R. y Díaz-Granados O, M. (1998). *Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia*. Universidad de los Andes. <https://pdfcoffee.com/vargas-diaz-granados-curvasidf-1998-5-pdf-free.html>
- Walling, D., Davies, T. y Hasholt, B. (1989). *Erosion, debris flows and environment in mountain regions*. International Association of Hydrological Sciences.
- Wang, W., Chen, G., Han, Z., Zhou, S., Zhang, H. y Jing, P. (2016). 3D numerical simulation of debris-flow motion using SPH method incorporating non-Newtonian fluid behavior. *Natural Hazards*, 81(3), 1981-1998. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2171-x>
- Webster, R. (2005). Soil Erosion and Conservation. *European Journal of Soil Science*, 56(5), 686-686. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.0756f.x>
- Welsh, A. J. (2007). *Delineating debris-flow hazards on alluvial fans in the Coromandel and Kaimai regions, New Zealand, using GIS*. University of Canterbury.
- Welsh, A. y Davies, T. (2011). Identification of alluvial fans susceptible to debris-flow hazards. *Landslides*, 8(2), 183-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0238-4>
- Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C. y Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1), 61-66. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>
- Wolman, G. (1954). A Method of Sampling Coarse RRiverR-Bed Material. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951-956. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>
- Xiao, B., Wang, Q.-H., Fan, J., Han, F.-P. y Dai, Q.-H. (2011). Application of the SCS-CN Model to Runoff Estimation in a Small Watershed with High Spatial Heterogeneity. *Pedosphere*, 21(6), 738-749. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60177-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60177-X)
- Yakubu, M. L., Yusop, Z. y Fulazzaky, M. A. (2016). The influence of rain intensity on raindrop diameter and the kinetics of tropical rainfall: case study of Skudai, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*, 61(5), 1-8. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.934251>
- Yoshimatsu, H. y Abe, S. (2006). A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method. *Landslides*, 3(2), 149-158. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0031-Y>
- Youberg, A., Cline, M. L., Cook, J. P., Pearthree, P. A. y Webb, R. H. (2008). Geologic Mapping of Debris-flow Deposits in the Santa Catalina Mountains, Pima Country, Arizona. En *Digital Map DM-DF-01 V1.0*. Arizona Geological Survey.
- Zhao, L.-H., Luo, Q., Li, L., Dan, H. y Luo, S. (2011). Stability of Subgrade Slope along River Subjected to Water Level Fluctuations and Stream Erosion. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 5(2), 1-9. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000056>
- Zhou, Q. (2017). Digital Elevation Model and Digital Surface Model. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology, October*, 1-17. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0768>
- Zhou, W. y Chang, M. (2016). *A rapid method to identify the potential of debris flow development induced by rainfall in the catchments of the Wenchuan earthquake area. October*. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0631-0>
- Zuluaga, I. y Sierra, J. (2012). Diseño y construcción de estabilización de un talud compuesto por suelos tropicales residuales mediante la técnica de Soil Nailing. *Obras Urbanas*, 36. <https://www.obrasurbanas.es/disenio-y-construccion-de-estabilizacion-de-un-talud-compuesto-por-suelos-tropicales-residuales-mediante-la-tecnica-de-soil-nailing/>



Quebrada Surcabásiga
Guacamayas, Boyacá
Fotografía de Andrés Reyes

Índices

Figuras

Figura 1.	Evolución de la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales elaboradas por el SGC	19
Figura 2.	Esquema metodológico para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales	20
Figura 3.	Esquema del área de estudio a escala 1:25 000 y las cuencas que la constituyen, municipio de Mocoa, Putumayo	32
Figura 4.	Cuenca de análisis que abarca el área de captación del río Frío en el municipio de Floridablanca, Santander	33
Figura 5.	Esquema del área de estudio a escala 1:2000. Municipio de Guacamayas, Boyacá	35
Figura 6.	Diferencias entre un MDS y un MDT	37
Figura 7.	Flujo de trabajo para el ajuste o verificación del modelo digital de elevaciones en la escala 1:25 000	40
Figura 8.	Procedimiento y flujo de trabajo para el ajuste o verificación del modelo digital de terreno en la escala 1:2000	41
Figura 9.	Flujo de trabajo y procedimiento para la caracterización de avenidas torrenciales	48
Figura 10.	Procedimiento para realizar el reconocimiento de la historia fluviotorrencial del territorio	51
Figura 11.	Esquema ilustrativo de la definición de la curva hipsométrica	54
Figura 12.	Esquema ilustrativo sobre los elementos a identificar en la representación cartográfica de una avenida torrencial, municipio de Mocoa, Putumayo	57
Figura 13.	Procedimiento para la identificación de la geomorfología indicativa	60
Figura 14.	Perfil geomorfológico ilustrativo de la amenaza relativa por avenidas torrenciales citada en Lancaster <i>et al.</i> (2012), cuyos criterios son adoptados para la definición de la susceptibilidad geomorfológica propuesta en esta guía	62
Figura 15.	Esquema de las entradas, procesos y productos involucrados en la caracterización de avenidas torrenciales en campo	64
Figura 16.	Variación en la meteorización subaérea y subsuperficial como una función del tiempo	66
Figura 17.	Anillos de meteorización en gravas de andesitas en depósitos aluviales del Japón central	67
Figura 18.	Procedimiento para la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia propuesto para la guía metodológica	79
Figura 19.	Hietogramas de diseño en la estación Ideam El Cucharó para un periodo de retorno de 10 años, una duración de 90 minutos y pasos de tiempo de 5 minutos	83
Figura 20.	Aproximación semidistribuida de la modelación hidrológica	84
Figura 21.	Representación esquemática de la modelación hidrológica	85
Figura 22.	Procedimiento para la modelación hidrológica propuesto a nivel agregado	86
Figura 23.	Esquema para construcción del mapa de fracción de cobertura vegetal (FCV) partiendo de la corrección del NDVI	97

Figura 24. Procedimiento para la modelación hidrológica propuesto para la producción de sedimentos a nivel de unidades de modelación	99
Figura 25. Procedimiento para la estimación de volúmenes de sólidos por deslizamientos, caídas de rocas y flujos	101
Figura 26. Esquema de pasos para la definición de zonas de aporte de sólidos	103
Figura 27. Esquema de sección transversal de un cauce teórico	104
Figura 28. Valores de intensidad para una determinada duración de lluvia a partir de curvas IDF	106
Figura 29. Sedimentogramas de la cuenca de la quebrada Surcabasiga, Guacamayas, Boyacá	107
Figura 30. Hidrograma de caudal líquido	108
Figura 31. Procedimiento para la modelación fluidodinámica a escala 1:25 000	110
Figura 32. Productos asociados a periodos de retorno de la modelación fluidodinámica	120
Figura 33. Procedimiento para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales 1:25 000	121
Figura 34. Esquema de la estrategia para sintetizar los diferentes valores de índice de intensidad de flujo asociados a una celda cualquiera para obtener un valor único	125
Figura 35. Matriz de integración para la zonificación de amenaza a escala 1:25 000	126
Figura 36. Procedimiento para la estimación de volúmenes de sólidos por inestabilidad de taludes debido a socavación lateral	136
Figura 37. Esquema de polígonos de erosión fluvial a lo largo del cauce principal	137
Figura 38. Distribución de velocidades de un fluido supuesta en el modelo fluidodinámico	138
Figura 39. Longitud de erosión de la banca por acción del flujo	141
Figura 40. Definición de los límites de análisis para la estabilidad de la banca	141
Figura 41. Esquemas de aporte de volumen por acción de la socavación lateral	143
Figura 42. Procedimiento para la modelación fluidodinámica a escala 1:2000	144
Figura 43. Procedimiento para la zonificación de amenaza cuantitativa de avenidas torrenciales	149
Figura 44. Curva de amenaza, que relaciona la magnitud del evento	151
Figura 45. Gráfica de índice de confiabilidad (Beta) vs. probabilidad de excedencia (o de falla) para diferentes distribuciones de probabilidad	153
Figura 46. Isolíneas de índice de intensidad de flujo (I_{DP}) mostrando así su relación con las velocidades y profundidades del flujo	156
Figura 47. Procedimiento para la estimación de volúmenes de detritos leñosos e identificación de puntos de represamiento	164
Figura 48. Curva de crecimiento de la vegetación	167
Figura 49. Puntos de acumulación de detritos leñosos largos en el cauce	175
Figura 50. Formato para la caracterización de avenidas torrenciales en campo – Página 1	222
Figura 51. Formato para la caracterización de avenidas torrenciales en campo – Página 2	223
Figura 52. Zonas a identificar dentro de una cuenca y su área de depósito	225
Figura 53. Morfología de depósitos según tipos de flujo en campo	226
Figura 54. Morfología de la superficie de los depósitos tipo flujo en campo	227
Figura 55. Evidencias de represamiento en campo	228
Figura 56. Encuesta para la reconstrucción de la historia fluviotorrencial del territorio	233
Figura 57. Formato de levantamiento de detritos leñosos	235

Tablas

Tabla 1.	Parámetros de la proyección	36
Tabla 2.	Elementos del paisaje natural y artificial a considerar para la revisión o construcción del MDT	38
Tabla 3.	Fuentes de información de carácter público	49
Tabla 4.	Listado de sensores remotos recomendados para la generación de capas temáticas	50
Tabla 5.	Atributos de la capa del inventario de avenidas torrenciales	58
Tabla 6.	Criterios para la cartografía de avenidas torrenciales mediante fotointerpretación	59
Tabla 7.	Temporalidad relativa de las geoformas indicativas de zonas de depósito	62
Tabla 8.	Relación entre el coeficiente de velocidad (K_c) y la altura o profundidad del flujo de detritos (H_c)	67
Tabla 9.	Asignación del coeficiente de rugosidad con base en las características del canal	69
Tabla 10.	Índices estadísticos del programa <i>R-climdex</i> utilizados en análisis de cambio en la precipitación extrema	77
Tabla 11.	Función y razón de insumos propuestos para modelación hidrológica	87
Tabla 12.	Función y razón de insumos propuestos para modelación hidrológica para la producción de sedimentos	95
Tabla 13.	Índice geológico (I_G) de materiales rocosos	105
Tabla 14.	Índice geológico (I_G) en suelos	105
Tabla 15.	Términos de resistencia al flujo que consideran la reología de una avenida torrencial	115
Tabla 16.	Herramientas computacionales para modelación de avenidas torrenciales a escala 1:25 000	117
Tabla 17.	Relaciones empíricas de caudal pico de una avenida torrencial	118
Tabla 18.	Relaciones empíricas de velocidad media de una avenida torrencial	118
Tabla 19.	Interpretación de las categorías de amenaza como parte de la leyenda sugerida a escala 1:25 000	128
Tabla 20.	Herramientas computacionales para modelación de avenidas torrenciales a escala 1:2000	147
Tabla 21.	Probabilidad de falla (excedencia anual) relacionada con el índice de confiabilidad para diferentes distribuciones de probabilidad	153
Tabla 22.	Categorías propuestas de acuerdo con el valor de IDF obtenido de las curvas de amenaza	154
Tabla 23.	Categorías según el valor de probabilidad obtenido de las curvas de amenaza	154
Tabla 24.	Agregación de resultados con los diferentes criterios a escala 1:2000	154
Tabla 25.	Interpretación general (ejemplo) de las categorías de amenaza para la escala 1:2000, caso piloto Guacamayas, Boyacá	155
Tabla 26.	Clasificación de eventos según su magnitud	157
Tabla 27.	Priorización por aporte de detritos leñosos (DL)	162
Tabla 28.	Atributos de la susceptibilidad por DL e insumos cartográficos	165
Tabla 29.	Unidades de cambio que definen el área de susceptibilidad por DL	165
Tabla 30.	Variables y atributos de la susceptibilidad por DL	166
Tabla 31.	Rangos de HI	167
Tabla 32.	Relación de la curva hipsométrica (CH) e integral hipsométrica (IH) con el estado de crecimiento de la vegetación	168
Tabla 33.	Orden de suelos T	168
Tabla 34.	Altura promedio de la vegetación (HV)	169
Tabla 35.	Profundidad radicular	169

Tabla 36.	Carga de la cobertura (CC)	169
Tabla 37.	Estado actual de la cobertura	170
Tabla 38.	Relación de la precipitación con la susceptibilidad a DL	170
Tabla 39.	Relación de la duración (min) con la susceptibilidad P	171
Tabla 40.	Relación del periodo de retorno (Tr) con la susceptibilidad P	171
Tabla 41.	Relación curvas intensidad/duración/frecuencia (valores en mm/h) con la susceptibilidad P	171
Tabla 42.	Evaluación cualitativa de susceptibilidad por atributo	171
Tabla 43.	Vientos (V)	171
Tabla 44.	Recopilación de Fan <i>et al.</i> (2020) para la clasificación de represamientos según la geomorfometría propuesta por Costa y Schuster (1988) y Hermanns <i>et al.</i> (2011)	177
Tabla 45.	Recopilación propuesta por Fan <i>et al.</i> (2020) de índices para evaluar la probabilidad de formación de un represamiento	178
Tabla 46.	Compilación de índices para evaluar la probabilidad de falla de los represamientos por movimientos de masa, propuesto por Fan <i>et al.</i> (2020)	179
Tabla 47.	Estructura general de la base de datos geográfica	184
Tabla 48.	Campos de la sección de información general dentro del formato del inventario de avenidas torrenciales	216
Tabla 49.	Campos de la sección de localización dentro del formato del inventario de avenidas torrenciales	217
Tabla 50.	Campos de la sección de índices morfométricos de la cuenca dentro del formato del inventario de avenidas torrenciales	217
Tabla 51.	Campos de las secciones precipitación y UGS dentro del formato del inventario de avenidas torrenciales	218
Tabla 52.	Clasificación de espesores y textura del suelo	218
Tabla 53.	Campos de las secciones de geomorfología indicativa y cobertura/uso del suelo dentro del formato del inventario de avenidas torrenciales	219
Tabla 54.	Campos de la sección "depósito de la avenida torrencial histórica" dentro del formato del inventario de avenidas torrenciales	219
Tabla 55.	Campos de las secciones de flujo y afectación dentro del formato del inventario de avenidas torrenciales	220
Tabla 56.	Morfología de la superficie de depósitos recientes	224
Tabla 57.	Morfología de las márgenes de los sedimentos acumulados recientemente	224
Tabla 58.	Daños en la vegetación y evidencias de erosión	229
Tabla 59.	Propiedades físicas de los depósitos de flujo de agua, flujo hiperconcentrado y flujo de detritos o de lodos	229



» Dabeiba, Antioquia, 2021
Fotografía de Michael Rangel



9

Anexos



San Eduardo, Boyacá, 2019
Fotografía de Andrés Reyes

Anexo 1. Formato para el inventario histórico de avenidas torrenciales

A continuación, son descritos cada uno de los campos que deben ser diligenciados en el formato sugerido para el inventario histórico de avenidas torrenciales.

Información general

En esta sección del formato es diligenciada la información primaria de la ocurrencia de un evento (tabla 48).

- » ID: corresponde a la codificación numérica consecutiva que se asignará a cada uno de los eventos inventariados. Queda a criterio del responsable estandarizar la codificación.
- » Responsable o encuestador: nombre o datos que permitan identificar a quien realice el diligenciamiento de los campos del inventario.
- » Ruta de la geodatabase: ruta de la carpeta donde se encuentra la geodatabase que contiene la representación cartográfica del inventario.
- » Ruta de la información secundaria: corresponde a la ruta de la carpeta donde se encuentran los documentos de soporte de lo diligenciado en el inventario (p. ej., fotografías, documentos técnicos, reportajes de noticieros, videos).
- » Tipo de documento: hace referencia a los tipos de documentos que fueron fuente de consulta donde se describe el evento inventariado. Para ello se recomiendan cinco categorías: (1) artículo científico, documentos publicados en revistas de carácter científico académico; (2) reporte de entidades, documentos técnicos elaborados por entidades estatales o bases de datos oficiales (p. ej., UNGRD, Ideam, SGC, POMCA, POT-EOT, CAR); (3) informe de consultoría, reportes de instituciones académicas o sectores privados; (4) prensa, noticias en cualquier formato (videos, periódico, reportajes televisivos), y (5) otro, donde se consideran informes o bases de datos de instituciones internacionales (p. ej., DesInventar o monitor administrado por OCHA).
- » Referencia bibliográfica: citación en un formato estandarizado (p. ej., APA) de las fuentes de información del evento.
- » Fecha del reporte: fecha en la que se hizo el diligenciamiento del inventario.
- » Fecha del evento: corresponde al año, mes y día del evento. Este dato permitirá la localización temporal de la avenida torrencial y establecer la recurrencia en caso de que se presente más de un evento con magnitudes similares.
- » Calidad de la información: cualidad con la que se valora la información que presentan los documentos consultados. Para ello se recomiendan las siguientes categorías:
 - Descripción simple basada en los hechos: documentos con información técnica limitada, sin mediciones de características del evento, se basa en testimonios o visitas, con información recopilada en un periodo de tiempo corto.
 - Descripción detallada basada en los hechos: información recopilada de las características del evento con alguna profundidad técnica.
 - Información extraída de mediciones en campo: información técnica con medi-

Anexo 2. Formato para la caracterización de avenidas torrenciales en campo

Para el levantamiento de la información en campo se propone un formato (figuras 50 y 51) que debe ser diligenciado a partir de las evidencias físicas encontradas en el área de estudio. El formato fue hecho con el fin de determinar qué tipos de flujos se han dado lugar en la cuenca partiendo de las características sedimentológicas de los depósitos. También tiene como objetivo describir en detalle la distribución de los materiales y las evidencias dejadas por una avenida torrencial que haya ocurrido recientemente.

El formato para la caracterización de avenidas torrenciales se divide en cuatro grandes secciones: la primera corresponde a la caracterización de la disposición de los materiales cuando ha ocurrido una avenida torrencial recientemente, y está conformada por la morfología de los depósitos recientes, la distribución de los sedimentos, daños en la vegetación y evidencias de erosión; la segunda se refiere a las propiedades físicas de los depósitos, y aplica tanto para sedimentos acumulados en flujos recientes como para los depósitos preexistentes. Por otra parte,

se tiene una sección dirigida a la morfometría de los depósitos y del canal, además de los espacios para esquemas y notas. Se debe realizar como mínimo un esquema de la sección transversal del canal donde queden representados los depósitos encontrados y a los que hace referencia el formato, además de la representación de procesos de erosión, movimientos en masa, presas, entre otras características relevantes de la estación, las cuales deben estar acompañadas de dimensiones. Por último, el formato contiene una tabla de clasificación que sirve como guía para la determinar del tipo de flujo que se está describiendo (figuras 50 y 51). En esa parte, las características que definen a cada tipo de flujo son categorizadas mediante los números asignados a cada casilla del formato, donde los números en negrilla son aquellas propiedades únicas de cada tipo de flujo.

A continuación, se describe cada una de las secciones que conforma el formato y los criterios sedimentológicos que se deben tener en cuenta para describir los depósitos.

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> Formato para caracterización de avenidas torrenciales Servicio Geológico Colombiano - Pontificia Universidad Javeriana </div> </div>										
Datos de registro										
Encuestador		Fecha del evento			Fecha del reporte			Proyecto		Institución
		DD	MM	AA	DD	MM	AA			Formato N.º
Localización geográfica					Localización geomorfológica					
Por división política					Coordenadas geográficas/Planas					
Departamento					Referente geográfico:					
Municipio					Latitud/Norte:					
Vereda					Longitud/Este:					
					Altura (m. s. n. m):					
					Proyección:					
Zona de transporte					Zona de depósito					
Cuenca alta					Proximal					
Cuenca media					Media					
Cuenca baja					Distal					
Margen derecha										
Margen izquierda										
Morfología de los depósitos recientes*					Daños en la vegetación y evidencias de erosión*					
Superficie del depósito		Márgenes del depósito			1. Revestimiento de lodo o lodo arenoso sobre la vegetación, cantos etc.					
1. Relieve positivo		1. Márgenes lobuladas y/o diques			6. Herida en la corteza del tronco (descortezado)					
2. Superficies incididas por canales con cantos y bloques		2. Evidencias de represamientos (acumulación de material vegetal y detritico, terrazas de sedimentos colgadas o adosadas sobre los márgenes del canal)			7. Vegetación arrancada de raíz					
3. Duna y/o ripples		3. Depósitos de avulsión			8. Hierba, pasto aplanado					
4. Superficies incididas por canales		4. Frente de bloques			9. Hierba, pasto y material antrópico en las ramas de los árboles					
5. Acumulación aleatoria de clastos gruesos y en contacto					10. Sedimentos "consolidados" empaquetados entre raíces o dentro de cavidades de árboles					
6. Superficie suave y/o rugosa										
7. Antidunas										
Propiedades físicas del depósito (Estrato n.º 1)										
Fábrica		Textura del armazón			Selección		Textura de la matriz			Consolidación
Relación Armazón/Matrix		Tamaños de grano (%)			Forma y esfericidad		Tamaños de grano (%)		Forma y esfericidad	
Armazón (%)	Matrix-soportado	Finos (Limos-Arcillas < 0,075 mm)			1. Muy angular		Finos (Limos-Arcillas < 0,075 mm)		1. Muy angular	
Matrix (%)	Clasto-soportado	Arena fina (0,075-0,425 mm)			2. Angular		Arena fina (0,075-0,425 mm)		2. Angular	
Espeor		Arena media (0,425-2,0 mm)			3. Sub-angular		Arena media (0,425-2,0 mm)		3. Sub-angular	
Orientación de los granos		Arena gruesa (2,0-4,75 mm)			1. Esfericidad alta		Arena gruesa (2,0-4,75 mm)		1. Esfericidad alta	
1. Imbricación	3. Orientación aleatoria	Gravas finas (4,75-19 mm)			2. Esfericidad baja		Gravas finas (4,75-19 mm)		2. Esfericidad baja	
2. Paralela al flujo		Gravas gruesas (19-75 mm)			3. Redondeada		Gravas gruesas (19-75 mm)		3. Redondeada	
Dirección (Azimut)		Cantos (75-300 mm)			4. Sub-redondeada		Cantos (75-300 mm)		4. Sub-redondeada	
		Bloques (> 300 mm)			5. Redondeada				5. Redondeada	
					6. Bien redondeada				6. Bien redondeada	
									1. Semi-consolidado	
									2. Consolidado	
									3. Suelto/Friable	
Composición litológica/Descripción		Meteorización de los clastos			Estructuras sedimentarias			Est. Erosión		
		Anillos de meteorización			1. Estratificación masiva o sin estructuras			1. Scour and fill		
		Superficies de oxidación de tonalidad clara			2. Estratos con laminación cruzada			Rasgos de erosión		
		Superficies de oxidación de tonalidad oscura			3. Estratos con laminación en artesa			2. Surcos		
		Desarrollo de relieve en la superficie del dasto			4. Estratificación gradada			3. Cárcavas		
		Presencia de fracturas			5. Gradación normal			4. Erosión lateral		
		Presencia de minerales arcillosos por meteorización			6. Gradación inversa			5. Socavación de fondo		
		Presencia de escamación								
Propiedades físicas del depósito (Estrato n.º 2)										
Fábrica		Textura del armazón			Selección		Textura de la matriz			Consolidación
Relación Armazón/Matrix		Tamaños de grano (%)			Forma y esfericidad		Tamaños de grano (%)		Forma y esfericidad	
Armazón (%)	Matrix-soportado	Finos (Limos-Arcillas < 0,075 mm)			1. Muy angular		Finos (Limos-Arcillas < 0,075 mm)		1. Muy angular	
Matrix (%)	Clasto-soportado	Arena fina (0,075-0,425 mm)			2. Angular		Arena fina (0,075-0,425 mm)		2. Angular	
Espeor		Arena media (0,425-2,0 mm)			3. Sub-angular		Arena media (0,425-2,0 mm)		3. Sub-angular	
Orientación de los granos		Arena gruesa (2,0-4,75 mm)			1. Esfericidad alta		Arena gruesa (2,0-4,75 mm)		1. Esfericidad alta	
1. Imbricación	3. Orientación aleatoria	Gravas finas (4,75-19 mm)			2. Esfericidad baja		Gravas finas (4,75-19 mm)		2. Esfericidad baja	
2. Paralela al flujo		Gravas gruesas (19-75 mm)			3. Redondeada		Gravas gruesas (19-75 mm)		3. Redondeada	
Dirección (Azimut)		Cantos (75-300 mm)			4. Sub-redondeada		Cantos (75-300 mm)		4. Sub-redondeada	
		Bloques (> 300 mm)			5. Redondeada				5. Redondeada	
					6. Bien redondeada				6. Bien redondeada	
									1. Semi-consolidado	
									2. Consolidado	
									3. Suelto/Friable	
Composición litológica/Descripción		Meteorización de los clastos			Estructuras sedimentarias			Est. Erosión		
		Anillos de meteorización			1. Estratificación masiva o sin estructuras			1. Scour and fill		
		Superficies de oxidación de tonalidad clara			2. Estratos con laminación cruzada			Rasgos de erosión		
		Superficies de oxidación de tonalidad oscura			3. Estratos con laminación en artesa			2. Surcos		
		Desarrollo de relieve en la superficie del dasto			4. Estratificación gradada			3. Cárcavas		
		Presencia de fracturas			5. Gradación normal			4. Erosión lateral		
		Presencia de minerales arcillosos por meteorización			6. Gradación inversa			5. Socavación de fondo		
		Presencia de escamación								

» Figura 50. Formato para la caracterización de avenidas torrenciales en campo – Página 1

Formato para caracterización de avenidas torrenciales Servicio Geológico Colombiano - Pontificia Universidad Javeriana											
Propiedades físicas del depósito (Estrato n.º 3)											
Fábrica		Textura del armazón				Selección		Textura de la matriz		Consolidación	
Relación Armazón/Matriz		Tamaños de grano (%)		Forma y esfericidad				Tamaños de grano (%)		Forma y esfericidad	
Armazón (%) <input type="checkbox"/>	Matriz-soportado <input type="checkbox"/>	Finos (Limos-Arcillas < 0,075 mm) <input type="checkbox"/>		1. Muy angular <input type="checkbox"/>		1. Buena <input type="checkbox"/>		Finos (Limos-Arcillas < 0,075 mm) <input type="checkbox"/>		1. Muy angular <input type="checkbox"/>	
Matriz (%) <input type="checkbox"/>	Clasto-soportado <input type="checkbox"/>	Arena fina (0,075-0,425 mm) <input type="checkbox"/>		2. Angular <input type="checkbox"/>		2. Moderada <input type="checkbox"/>		Arena fina (0,075-0,425 mm) <input type="checkbox"/>		2. Angular <input type="checkbox"/>	
Espesor _____		Arena media (0,425-2,0 mm) <input type="checkbox"/>		3. Sub-angular <input type="checkbox"/>		3. Mala <input type="checkbox"/>		Arena media (0,425-2,0 mm) <input type="checkbox"/>		3. Sub-angular <input type="checkbox"/>	
Orientación de los granos		Arena gruesa (2,0-4,75 mm) <input type="checkbox"/>		4. Sub-redondeada <input type="checkbox"/>		4. Muy mala <input type="checkbox"/>		Arena gruesa (2,0-4,75 mm) <input type="checkbox"/>		4. Sub-redondeada <input type="checkbox"/>	
1. Imbricación <input type="checkbox"/>		Gravas finas (4,75-19 mm) <input type="checkbox"/>		5. Redondeada <input type="checkbox"/>				Gravas finas (4,75-19 mm) <input type="checkbox"/>		5. Redondeada <input type="checkbox"/>	
2. Paralela al flujo <input type="checkbox"/>		Gravas gruesas (19-75 mm) <input type="checkbox"/>		6. Bien redondeada <input type="checkbox"/>				Gravas gruesas (19-75 mm) <input type="checkbox"/>		6. Bien redondeada <input type="checkbox"/>	
Dirección (Azimut) _____		Cantos (> 300 mm) <input type="checkbox"/>						Cantos (> 300 mm) <input type="checkbox"/>			
Composición litológica/Descripción			Meteorización de los clastos			Estructuras sedimentarias			Est. Erosión		
			Anillos de meteorización <input type="checkbox"/>			1. Estratificación masiva o sin estructuras <input type="checkbox"/>			1. Scour and fill <input type="checkbox"/>		
			Superficies de oxidación de tonalidad clara <input type="checkbox"/>			2. Estratos con laminación cruzada <input type="checkbox"/>			2. Sueros <input type="checkbox"/>		
			Superficies de oxidación de tonalidad oscura <input type="checkbox"/>			3. Estratos con laminación planar <input type="checkbox"/>			3. Cárcavas <input type="checkbox"/>		
			Desarrollo de relieve en la superficie del clasto <input type="checkbox"/>			4. Estratos con laminación en artesa <input type="checkbox"/>			4. Erosión lateral <input type="checkbox"/>		
			Presencia de fracturas <input type="checkbox"/>			Estratificación gradada <input type="checkbox"/>			5. Socavación de fondo <input type="checkbox"/>		
			Presencia de minerales arcillosos por meteorización <input type="checkbox"/>			5. Gradación normal <input type="checkbox"/>					
			Presencia de escamación <input type="checkbox"/>			6. Gradación inversa <input type="checkbox"/>					
Deposición y erosión reciente				Depósitos subrecientes y/o antiguos		Notas					
Alto de la terraza erosionada (m) _____		Longitud de la presa (m) _____		Espesor total del depósito _____							
Longitud de la terraza erosionada (m) _____		Ancho de la presa (m) _____		Longitud _____							
**Alto del depósito reciente (m) _____		Alto del flujo (m) _____		Ancho _____							
**Longitud del depósito reciente (m) _____		Alto de la terraza o del depósito descrito (m) _____									
**Espesor del depósito reciente (m) _____											
Alto de la presa (m) _____											
Clasificación del flujo											
Clasificación según reología	Morfología del depósito		Daños vegetación/ erosión	Propiedades físicas del depósito				Estructuras		Clasificación según las características sedimentológicas del material movilizado	
	Superficie	Margen		Orientación de los granos	Forma de los granos	Esfericidad de los granos	Selección	Estado de consolidación	Sedimentarias		Erosión
Flujo de corriente	3,4,5		8,9	1	4,5,6	1	1,2	3	5,6	2,3,4,5	*Inundación rápida de agua clara <input type="checkbox"/>
Hiperconcentrados	5,6,7	2,3	1,5,8,9	2,3	4,5,6	1,2	3,4	1	1,2,3	2,3,4,5	**Inundación de detritos <input type="checkbox"/> **Inundación de lodos <input type="checkbox"/>
Flujos de detritos	1,2,5	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6,7,8,9	3	1,2,3,4,5	1,2	4	2	1,4	1,2,3,4,5	**Flujo de detritos <input type="checkbox"/> **Flujo de lodos <input type="checkbox"/>
Esquemas											
Planta						Perfil					

*Campos obligatorios para flujos recientes

» Figura 51. Formato para la caracterización de avenidas torrenciales en campo – Página 2

Localización geomorfológica

En esta sección se identifica en qué parte de la cuenca o de la zona de depósito se encuentra quién está llevando a cabo el levantamiento de campo. Comprende la zona de tránsito en el caso de presentar depósitos fluviotorrenciales en sector alto de la cuenca, de captación de agua o tramo asociado a peralte; o de si el encuestador se encuentra aguas abajo del cambio abrupto de pendiente en el perfil longitudinal del canal que comprende la zona de depósito, debe mencionar si está sobre la parte proximal, media o distal del abanico o geoforma indicativa (figura 52). Esto también aplica para otros tipos de geoformas indicativas de zonas de depósito.

Morfología de los depósitos recientes

En esta sección se deben identificar las características morfológicas de los depósitos recientes

(< 500 años) expuestas en la superficie y en las márgenes de los sedimentos acumulados. Es importante señalar que las características morfológicas de un mismo tipo de flujo pueden variar según su magnitud y no necesariamente tiene que cumplir en su totalidad con todas las características para ser definido de un tipo u otro. En las tablas 56 y 57 se clasifican las características morfológicas de la superficie y las márgenes de los sedimentos, según el tipo de flujo que les dieron origen, respectivamente. La distribución de los materiales en un mismo evento puede variar ampliamente con las concentraciones que hayan presentado en el evento, su magnitud y la ocurrencia de uno o más pulsos. Por tanto, para elaborar la cartografía de un evento reciente y clasificarlo correctamente es fundamental hacer un cubrimiento importante de campo articulando todas las evidencias diligenciadas en los formatos, libretas y fotointerpretación.

» **Tabla 56.** Morfología de la superficie de depósitos recientes

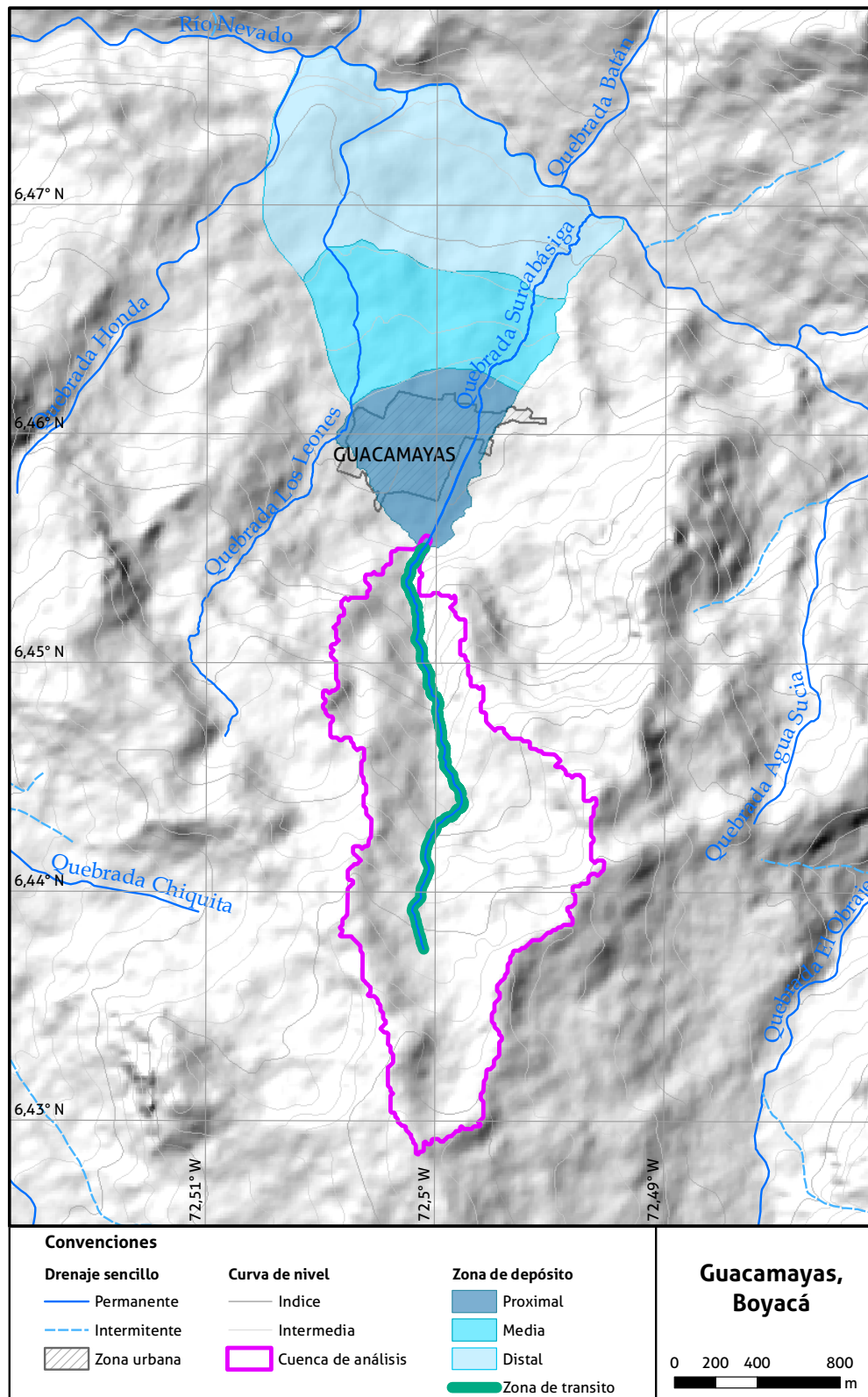
Morfología de la superficie del depósito	Flujo de agua o corriente (crecida)	Flujo hiperconcentrado	Flujo de detritos o lodos	Ejemplo
Relieve positivo hacia el centro del canal (morfología convexa), es común la presencia de bloques dispuestos aleatoriamente			X	Figura 59
Superficies incididas por canales con cantos y bloques			X	
Dunas y/o ripples	X			Figura 60
Superficies incididas por canales	X	X		
Superficie suave y/o rugosa		X		
Antidunas		X		
Acumulación aleatoria de clastos gruesos y en contacto (suelos)			X	

Fuente: recopilación de Kim *et al.* (1995); Jakob y Hungr (2005); Pierson (2005); Theule *et al.* (2015).

» **Tabla 57.** Morfología de las márgenes de los sedimentos acumulados recientemente

Morfología de la margen del depósito	Flujo hiperconcentrado	Flujo de detritos o lodos	Ejemplo
Márgenes lobuladas y/o diques		X	Figura 61
Evidencias de represamientos (acumulación de material vegetal y detrítico, terrazas de sedimentos colgadas o adosadas sobre las márgenes del canal)	X	X	
Depósitos de avulsión	X	X	
Frente de bloques		X	

Fuente: recopilación de Bowman y Lund (2016); Cui *et al.* (2013); Jakob y Hungr (2005); Pierson (2005); Sohn *et al.* (1999); Takahashi (2014).



» **Figura 52.** Zonas a identificar dentro de una cuenca y su área de depósito

Se toma como ejemplo la cuenca de la quebrada Surcabásiga en el municipio de Guacamayas, Boyacá.



» **Figura 53.** Morfología de depósitos según tipos de flujo en campo

a) Relieve positivo en la mitad del tránsito de un flujo de detritos en la quebrada El Carmen (Mocoa-Putumayo). b) Superficie erosionada con cantos y bloques en su interior en el flujo de detritos de la quebrada Taruca (Mocoa-Putumayo). Transversalmente forma la denominada estructura de erosión *scour and fill*. c) Ejemplo de *ripples* formados en un ambiente fluvial. d) Superficie incidida por canales superficiales desarrollada después del flujo hiperconcentrado que afectó el casco urbano de Floridablanca, Santander. Fecha del evento: 28/01/2020.

Fuente: c) <http://www.biodiversidadvirtual.org/geologia/data/media/1/Ripples-actuales-3382.jpg>



» **Figura 54.** Morfología de la superficie de los depósitos tipo flujo en campo

a) Superficie suave a levemente rugosa del depósito de un flujo hiperconcentrado acumulado en el lago del Jardín Botánico de Floridablanca-Santander. Fecha del evento: 28/01/2020. b) Antidunas en formación de un flujo hiperconcentrado en el monte Pinatubo, Filipinas. c) acumulación aleatoria de clastos en contacto del flujo de detritos de Mocoa-Putumayo. Fecha del evento: 31/03/2019. d) Márgenes lobuladas o con presencia de diques. Fuente: b) Takahashi (2014); d) Theule *et al.* (2015).



» **Figura 55.** Evidencias de represamiento en campo

a) Niveles de sedimentos como evidencias de represamientos. Margen derecha de la quebrada Taruquita, Mocoa-Putumayo. Fecha del evento: 31/03/2017. b) Presa parcial remanente sobre la margen izquierda de la quebrada Taruquita cerca de su confluencia con la quebrada Taruca en Mocoa-Putumayo. Fecha del evento: 31/03/2017. c) Depósito de avulsión dejado por la quebrada Taruca después de su confluencia con la quebrada Taruquita en Mocoa-Putumayo. Fecha del evento: 31/03/2017. d) Frente de bloques dejado por el flujo de detritos ocurrido en la Vereda La Virginia, Chaparral-Tolima. Fecha del evento: 26/12/2019

Daños en la vegetación

En esta sección se deben identificar las evidencias dejadas por una avenida torrencial sobre la vegetación circundante, entre ellas las citadas en la tabla 58 (Pierson, 2005). Sin embargo, cabe resaltar que los daños en la vegetación pueden variar según la magnitud del flujo y la distancia a la que se encuentre del mismo.

Propiedades físicas de los depósitos

En esta sección del formato se busca estandarizar de alguna manera los datos comúnmente tomados en campo cuando se describen los depósitos (figuras 50 y 51). En varios casos, los depósitos pueden compartir ciertas propiedades, sin embargo, existen algunas de ellas que son de-

terminantes a la hora de diferenciar los tipos de flujos que les dieron origen como la orientación de los granos, selección (equivalente a la gradación en geotecnia, pero con definición opuesta) y las estructuras sedimentarias. En la tabla 59 se resumen las propiedades físicas que caracterizan a cada tipo de flujo, excepto por los tamaños de clastos involucrados en cada uno, y sobre las cuales se ahondará a continuación.

Meteorización de los clastos

El estado de meteorización de los clastos es uno de los criterios para definir la temporalidad relativa de los depósitos, el cual se describe más adelante y con mayor profundidad en los criterios para definir la temporalidad relativa de las geofrmas en campo.

» **Tabla 58.** Daños en la vegetación y evidencias de erosión

Daños en la vegetación y evidencias de erosión	Flujo de agua o corriente (crecida)	Flujo hiperconcentrado	Flujo de detritos o lodos
Árboles con madera astillada			X
Gravas embebidas en la madera			X
Troncos de árboles cortados			X
Ramas cortadas o dobladas		X	X
Herida en la corteza del tronco (descortezado)			X
Vegetación arrancada de raíz			X
Hierba o pasto aplanado	X	X	X
Hierba, pasto y material antrópico en las ramas de los árboles	X	X	X
Sedimentos “consolidados” empaquetados entre raíces, dentro de cavidades de arboles			X
Revestimiento de lodo o lodo arenoso sobre vegetación, cantos, cercas etc.		X	X

Fuente: Pierson (2005).

» **Tabla 59.** Propiedades físicas de los depósitos de flujo de agua, flujo hiperconcentrado y flujo de detritos o de lodos

Propiedades físicas de un depósito	Flujo de agua o corriente (crecida)	Flujo hiperconcentrado	Flujo de detritos o de lodos
Imbricación	X		
Orientación de los granos	Paralela al flujo	X	
	Orientación aleatoria	X	X
Forma de los granos	Muy angular		X
	Angular		X
	Subangular		X
	Redondeada		X
	Bien redondeada		
Esfericidad	Alta	X	X
	Baja		X
Selección	Buena	X	
	Moderada	X	X
	Mala		X
	Muy mala		X
Estado de consolidación	Semiconsolidado	X	
	Consolidado		X
Estructuras sedimentarias	Suelto/Friable	X	
	Estratificación masiva o sin estructuras		X
	Estratos con laminación planar		X
	Estratos con laminación cruzada	X	
	Estratos con laminación cruzada en artesa	X	
	Gradación normal		X
	Gradación inversa		

Fuente: compilado de Bowman y Lund (2016); Coussot y Meunier (1996); Jakob y Hungr (2005); Pierson (2005); Sam Boggs (2006); Sohn *et al.* (1999).

Tamaños del grano del armazón y de la matriz (granulometría en campo)

Los tamaños de grano adoptados para la descripción granulométrica del armazón y la matriz son los implementados en la *Guía metodológica para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017), para la descripción de suelos, que a su vez fueron tomados de la American Society for Testing and Materials International (ASTM, 2000). Esta sección del formato fue hecha para una estimación visual del porcentaje de tamaños de las partículas, sin embargo, a los depósitos fluvio-torrenciales o aluviales de dimensiones importantes encontrados a lo largo de la zona de tránsito y que presenten evidencias de erosión lateral, se les debe hacer conteo de clastos (armazón). Es importante resaltar que el conteo se debe hacer para cada estrato o capa que conforma al depósito, a los cuales se les tiene que caracterizar las demás propiedades físicas que indica el formato de campo. Para el caso de la matriz, se deben diligenciar los porcentajes de tamaños encontrados con ayuda del formato mediante estimación visual. Con base en metodologías para conteo de clastos en lechos de ríos y metodologías de proveniencia de los clastos (p. ej., Bordy *et al.*, 2016; Bunte y Abt, 2001; CDPHE, 2009; Wolman, 1954), se aconseja elaborar una malla con un espaciamiento definido por el D_{max} que tenga el estrato; los clastos a describir en términos de tamaño (longitud del eje b) y la composición litológica serán los señalados por las intersecciones de la cuadrícula de la malla con un conteo mínimo de 100 muestras. Si el talud expuesto no es lo suficientemente grande para hacer este ejercicio, se recomienda utilizar la malla de conteo estándar con espaciamiento de 10 cm entre cada intersección de la cuadrícula. El conteo de clastos y matriz (proporción matriz/armazón) en los tramos donde se evidencie erosión lateral se hace con el fin de determinar el D_{50} utilizado para el cálculo de volúmenes de aporte

en la escala 1:2000. El mismo ejercicio se debe ejecutar en la zona de depósito con el fin de obtener el D_{90} o en su defecto el D_{max} de los eventos que la constituyen, que posteriormente será insumo directo en la definición de la amenaza a escala 1:25 000. Igualmente, en el lecho o canal también se recomienda un conteo de clastos, si la fase de modelación requiere de esa información; para esto se pueden utilizar metodologías de conteo en campo como la de Wolman (1954) por su sencillez y practicidad.

Morfometría de los depósitos

Además de la cartografía que debe hacer el geólogo en su mapa de campo, también tendrá que tomar las dimensiones de los depósitos descritos. Para ello el formato tiene esta sección donde se diligencia el espesor total del depósito, su longitud y ancho, asimismo, se registra y se cartografía la longitud y alto de erosión en caso de que haya ocurrido un evento recientemente. También se deben tomar las dimensiones de las evidencias de represamientos que en la actualidad pueden ser presas parciales o acumulaciones de material vegetal y detrítico dispuesto dentro del canal; también, la localización de este tipo de evidencia quedará georreferenciada y cartografiada.


Esta sección es de gran importancia ya que con su diligenciamiento se deben calcular los volúmenes de material dispuestos a lo largo de la zona de tránsito conformada por los depósitos fluvio-torrenciales-aluviales y las presas parciales. Las dimensiones y características texturales y composicionales de los depósitos coluviales y las masas desplazadas por movimientos en masa que se encuentren en la zona de tránsito, también se deben describir mediante el uso de la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000* (Rodríguez *et al.*, 2017), en caso de que no se encuentren cartografiados dentro de los productos generados en la caracterización geoambiental.

Anexo 3. Geoformas indicativas de zonas de aporte y zonas de depósito de sedimentos en avenidas torrenciales

Ambiente geomorfológico	Unidad/subunidad/Componente geomorfológica	Acrónimo	Aporte/depósito
Denudacional	Cuenca denudada	Dcd	Aporte
	Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción-Coluvión-Depósitos de ladera	Dco	Aporte
	Cono de talus	Dct	Aporte
	Cono de deslizamiento indiferenciado-Deslizamiento indiferenciado	Ddi	Aporte
	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	Ddrt	Aporte
	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	Ddtr	Aporte
	Escarpe	De	Aporte
	Escarpe de erosión mayor	Deem	Aporte
	Escarpe de erosión menor	Deeme	Aporte
	Cono flujos de detritos	Dfd	Aporte-Depósito
	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	Dft	Depósito-Aporte
	Lóbulo y cono de avalancha de detritos	Dlcad	Aporte
	Lóbulo y cono de avalancha de rocas	Dlcar	Aporte
	Flujo de detritos canalizados-Cono o lóbulo de flujo de detritos	Dlfd	Depósito-Aporte
	Flujo de detritos de ladera	Dlfdl	Aporte
	Cono o lóbulo de flujo de lodo	Dlfl	Aporte-Depósito
	Depósito de movimiento en masa	Dmm	Aporte
Fluvial	Abanico aluvial	Faa	Depósito
	Abanico aluvial antiguo	Faaa	Depósito
	Abanico aluvial actual	Faaac	Depósito
	Abanico aluvial incidido	Faai	Depósito
	Abanico fluviotorrencial antiguo	Faan	Depósito
	Abanico aluvial subreciente	Faas	Depósito
	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (bajadas)	Fac	Depósito
	Abanico fluviotorrencial	Faft	Depósito-Aporte
	Abanico fluviotorrencial actual	Fafta	Depósito-Aporte
	Abanico fluviotorrencial coalescente	Faftc	Depósito-Aporte
	Abanico fluviotorrencial coalescente antiguo	Faftca	Depósito
	Abanico fluviotorrencial muy antiguo	Faman	Depósito
	Cauce aluvial-Cauce activo-Cauce o lecho actual del río	Fca	Aporte
	Cono de deyección	Fcdy	Aporte-Depósito
	Depósitos aluviales antiguos	Fdaa	Depósito
	Depósitos aluviales recientes	Fdar	Aporte-Depósito
	Escarpe de abanico	Fea	Aporte
	Escarpe de cono de deyección	Fecdy	Aporte
	Escarpe de terraza o abanico	Feta	Aporte
	Planicie aluvial confinada	Fpac	Aporte
Plano o llanura de inundación	Fpi	Aporte-Depósito	

Ambiente geomorfológico	Unidad/subunidad/Componente geomorfológica	Acrónimo	Aporte/depósito
Fluvial	Terraza aluvial	Ft	Aporte-Depósito
	Terraza de acumulación	Fta	Aporte-Depósito
	Terraza de acumulación alta-Nivel de terraza alto	Ftaa-Fta	Depósito
	Terraza de acumulación baja-Nivel de terraza bajo	Ftab-Ftb	Depósito-Aporte
	Flujo fluviotorrencial actual	Ftac	Depósito-Aporte
	Escarpe de terraza de acumulación-Escarpe de terraza aluvial	Ftae	Aporte
	Terraza de acumulación media-Nivel de terraza medio	Ftam-Ftm	Depósito
	Terraza de acumulación antigua	Ftan	Depósito
	Terraza de acumulación subreciente	Ftas	Depósito
	Escarpe de terraza-Escarpe de terraza aluvial	Fte	Aporte
	Terraza fluviotorrencial	Ftft	Aporte-Depósito
	Terraza fluviotorrencial-basculada	Fftfb	Aporte
	Escarpe de terraza fluviotorrencial	Ffte	Aporte
	Flujo fluviotorrencial subactual	Ftsa	Depósito-Aporte
	Valle fluviotorrencial	Fvft	Depósito
Microcuenca fluviotorrencial	Fmft	Depósito-Aporte	
Glaciar	Conos glaciofluviales	Gcgf	Aporte
	Cono y lóbulo de gelifracción	Gclg	Aporte
	Flujo volcánico glaciado	Gfv	Aporte
Volcánico	Cono lahárico	Vcl	Aporte
	Escarpes de lavas y flujos piroclásticos	Velf	Aporte
	Flujo lahárico aterrazado	Vfla	Aporte
	Escarpe de flujo lahárico aterrazado	Vflae	Aporte
	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado	Vfpe	Aporte
	Flujo piroclástico aterrazado-Terraza de flujo piroclástico	Vfp-Vtfp	Aporte
	Lóbulo de flujo piroclástico	Vfl	Aporte
Lóbulo de flujo lahárico	Vlfp	Aporte	

Anexo 4. Encuesta para la reconstrucción de la historia fluvio-torrencial del territorio

 Encuesta de percepción del riesgo y descripción de eventos fluvio-torrenciales Servicio Geológico Colombiano - Pontificia Universidad Javeriana																										
Datos de registro																										
Encuestador			Fecha del reporte			Proyecto			Institución			ID Formato														
			DD	MM	AA																					
Por división política					Localización geográfica					Perfil del encuestado																
Departamento _____					Referente geográfico: _____					Nombre del encuestado: _____																
Municipio _____					Coordenadas geográficas/Planas					Edad: _____																
Vereda _____					Latitud/Norte: _____					Tiempo en la vivienda o institución: _____																
Drenaje _____					Longitud/Este: _____																					
					Proyección: _____																					
Características del evento																										
Fecha evento			Exacta			Certeza mes-año			Certeza año			Confiable/baja			Fecha incierta			Hora evento			Material transportado					
DD	MM	AA																								
Concentración del flujo (Turbidez del agua)			Altura lámina de agua (m)			Espesor depósito (m)			Área total de afectación			Velocidad			Dirección vivienda/institución			Infraestructura afectada			Sistema estructural de construcción**					
Alta			Medio			Baja						Rápido			Lento			Vivienda			Institución			No. pisos		
Grado de daño			Total			Parcial			Solo inundación			Otro tipo de afectación														
Clasificación del flujo según encuestador*																										
Flujo de detritos			Flujo de lodos			Flujo hiperconcentrado (inundación de lodos)			Flujo hiperconcentrado (inundación de detritos)			Inundación de agua clara														
Causas del evento (Precipitación, represamientos, sismo etc.)																										
Percepción del riesgo																										
¿Cada cuánto espera un evento similar?					¿Hay sistema de alerta temprana (SAT)?					¿En eventos anteriores ha logrado evacuar?					Narración y descripción del evento fluvio-torrencial											
Cada año <input type="checkbox"/>					SI <input type="checkbox"/>					SI <input type="checkbox"/>																
Cada 6 meses <input type="checkbox"/>					No <input type="checkbox"/>					No <input type="checkbox"/>																
¿Cada cuánto?					¿Cuál?					¿Alguna entidad adelanta obras de mitigación o mantenimiento?																
¿Conoce la ruta y el lugar de evacuación?																										
SI <input type="checkbox"/>																										
No <input type="checkbox"/>					No existe <input type="checkbox"/>																					
Esquemas																										

* La información se debe diligenciar por profesional de Ing. Civil, Geología o afines, con conocimiento del tema, si no se tiene el perfil profesional no diligenciar este campo.

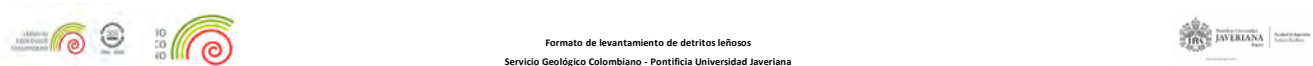
** Sistema estructural: 1. Pórticos en concreto reforzado, 2. Muros estructurales en concreto reforzado, 3. Sistema combinado en concreto reforzado, 4. Prefabricados en concreto, 5. Mampostería confinada, 6. Mampostería reforzada, 7. Mampostería no reforzada, 8. Pórticos en acero, 9. Pórtico arriostrado en acero, 10. Pórticos y paneles en madera, 11. Pórticos y paneles en otros materiales, 12. Muros en bahareque, 13. Muros en tapia pisada, 14. Muros en adobe, 15. Construcción improvisada, 16. Mixto, 17. Otro

» **Figura 56.** Encuesta para la reconstrucción de la historia fluvio-torrencial del territorio



Río Mulato, Municipio de Mocoa.
Avenida torrencial 2017
Foto: Andrés Reyes

Anexo 5. Formato de detritos leñosos

 <p style="text-align: center;">Formato de levantamiento de detritos leñosos Servicio Geológico Colombiano - Pontificia Universidad Javeriana</p>																													
I. Información general																													
N.° Identificador				Institución				Fecha				Nombre				Plancha (N.°, fuente y escala)													
II. Localización																													
Departamento				Municipio				Vereda				Macrocuenca / Cuenca / Microcuenca																	
Sitio																													
Tipo de medida	Coordenadas		Especie (Sp)	Ubicación: Cauce Activo o Llanura de inundación	L (Longitud tramo m)	I (Pendiente)	BBF	Densidad lineal	altura detritos H _U	ancho B/	largo L _J	Volumen <small>(Asumiendo forma de cilindro sólido)</small>	Observaciones <small>(Describir los efectos morfológicos: protección o erosión de las márgenes del cauce, desviación o bifurcación del cauce; retención de sedimentos)</small>	Tramo (Id)	Tipo de Medida	Coordenadas		Especie	Ubicación: cauce activo o llanura de inundación	L (Longitud tramo m)	I (Pendiente)	BBF	Densidad lineal	altura detritos H _U	ancho B/	largo L _J	Volumen <small>(Asumiendo forma de cilindro sólido)</small>	Observaciones <small>(Describir los efectos morfológicos: protección o erosión de las márgenes del cauce, desviación o bifurcación del cauce; retención de sedimentos)</small>	
							(m)	DL								(m)	DL					(m)	DL						
X		Y		X		Y		X		Y		X		Y		X		Y		X		Y		X		Y			
Árboles individuales	x													2	Árboles individuales	x													
Acumulaciones autóctonas	x													2	Acumulaciones autóctonas	x													
Acumulaciones mixtas	Diques leñosos	x												2	Diques leñosos	x													
	Acumulaciones a espigón	x												2	Acumulaciones a espigón	x													
Acumulaciones mixtas	x													2	Acumulaciones mixtas	x													
Árboles individuales	x													4	Árboles individuales	x													
Acumulaciones autóctonas	x													4	Acumulaciones autóctonas	x													
Acumulaciones mixtas	Diques leñosos	x												4	Diques leñosos	x													
	Acumulaciones a espigón	x												4	Acumulaciones a espigón	x													
Acumulaciones mixtas	x													4	Acumulaciones mixtas	x													

» **Figura 57.** Formato de levantamiento de detritos leñosos

Esta *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales* surge como una contribución tanto al conocimiento integral del territorio como a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible; además, es producto de la experiencia acumulada por el Servicio Geológico Colombiano en sus más de tres décadas en el estudio de los movimientos en masa, y de los trabajos de investigación y consultoría que ha realizado la Pontificia Universidad Javeriana sobre sistemas de alerta temprana y evaluación geotécnica, hidrológica e hidráulica asociados a este tipo de eventos.

Esta publicación completa la serie de manuales enfocados en la implementación del Decreto 1077 de 2020, en lo concerniente a la incorporación de la gestión de riesgo en el ordenamiento territorial.

