

Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos

Edier Aristizábal * 

María Isabel Arango Carmona + 

Ingrid Katherine García López △ 

Resumen

Las avenidas torrenciales son una de las amenazas de origen hidrometeorológico de mayor capacidad destructiva en términos de vidas humanas y pérdidas económicas, especialmente en ambientes montañosos y tropicales como Colombia. Sin embargo, no existe en nuestro país un consenso con respecto a la clasificación y terminología de eventos tipo flujos que permita caracterizar adecuadamente estos fenómenos. El presente artículo analiza el impacto, distribución espacial y temporal de dichos eventos en Colombia, y describe sus tipologías con base en las clasificaciones de fenómenos tipo flujo que se encuentran en el estado del arte. Se propone una clasificación de eventos tipo avenida torrencia para Colombia que incluye tres tipos de fenómenos: creciente súbita, inundación de escombros y flujo de escombros.

Palabras claves: Andes colombianos, avenidas torrenciales, creciente, desastre, flujos, inundación.

Ideas destacadas: artículo de revisión que propone una clasificación para los eventos tipo avenida torrencia en Colombia a través de un estudio del estado del arte en el tema a nivel mundial y, además, un análisis del impacto, distribución espacial y temporal de las avenidas torrenciales en el país.



RECIBIDO: 1 DE JUNIO DE 2018. | EVALUADO: 30 DE ENERO DE 2019. | ACEPTADO: 5 DE JULIO DE 2019.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Aristizábal, Edier; Arango Carmona, María Isabel; García López, Ingrid Katherine. 2020. "Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 29 (1): 242-258. doi: 10.15446/rcdg.v29n1.72612.

* Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín - Colombia. ✉ evaristizabal@unal.edu.co – ORCID: 0000-0002-2648-2197.

+ Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín - Colombia. ✉ miarangoc@unal.edu.co – ORCID: 0000-0001-8266-9186.

△ Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín - Colombia. ✉ ikgarcial@unal.edu.co – ORCID: 0000-0003-3504-599X.

✉ Correspondencia: Edier Aristizábal, calle 80 n.º 65-223, Medellín, Antioquia, Colombia. CP. 050034.

Definition and Classification of Torrential Avenues and Their Impact in the Colombian Andes

Abstract

Flash floods are one of the most destructive hydro-meteorological threats in terms of human lives and economic losses, especially in mountainous and tropical environments, such as Colombia. However, there is no consensus in our country regarding the terminology and classification of flow-type events that allows for an adequate characterization of these phenomena. The article analyzes the impact and the spatial and temporal distribution of those events in Colombia, and describes their typologies on the basis of state-of-the-art classifications of flow-type phenomena. It proposes a classification of flash flood events in Colombia, which includes three types of phenomena: sudden rise in water level, debris floods, and debris flows.

Keywords: Colombian Andes, flash floods, rise in water level, disaster, flows, flooding.

Main Ideas: Review paper that proposes a classification for flash flood events in Colombia through a study of the state-of-the-art research on the matter worldwide, as well as an analysis of the impact and spatial and temporal distribution of flash floods in the country.

Definição e classificação das avenidas torrenciais e seu impacto nos Andes colombianos

Resumo

As avenidas torrenciais são uma das ameaças de origem hidrometeorológica de maior capacidade destrutiva em termos de vidas humanas e perdas econômicas, em especial, em ambientes montanhosos e tropicais como o da Colômbia. Contudo, não existe, em nosso país, um consenso a respeito da classificação e da terminologia de eventos tipo fluxos que permita caracterizar, de forma adequada, esses fenômenos. Este artigo analisa o impacto, a distribuição espacial e temporal desses eventos na Colômbia, e descreve suas tipologias com base nas classificações de fenômenos tipo fluxo que se encontram no estado da arte. É proposta uma classificação de eventos tipo avenida torrenciais para o país que incluem três tipos de fenômenos: cheia súbita, inundação de cascalhos e fluxo de cascalhos.

Palavras-chaves: Andes colombianos, avenidas torrenciais, cheia, desastre, fluxos, inundação.

Ideias destacadas: artigo de revisão que propõe uma classificação para os eventos tipo avenida torrenciais na Colômbia por meio de um estudo do estado da arte no tema no mundo e, além disso, uma análise do impacto, da distribuição espacial e temporal das avenidas torrenciais no país.

Introducción

Los flujos torrenciales se describen como una mezcla de agua y sedimentos en diferentes proporciones, que se desplazan rápidamente a lo largo de cauces en cuencas pequeñas y de montaña, generando tiempos de respuesta muy cortos para la toma de acciones por parte de la población localizada en las zonas bajas inundables (Koutoulis y Tsanis 2010; Marchi et ál. 2010). De acuerdo con la base de datos de desastres naturales EM-DAT (Guha-Sapir, Below y Hoyois 2009) en Europa se presentaron 47 eventos considerables de inundación entre 1950 y 2005, con un saldo de 2.764 muertes, donde el 49% de los eventos fueron clasificados como inundaciones súbitas, con el 40% de los muertos (Barredo 2007). En los Estados Unidos entre el 80% y el 90% de pérdidas humanas asociadas con inundaciones son causadas por fenómenos descritos como inundaciones súbitas; entre 1969 y 1981 un total de 1.185 personas murieron debido a la ocurrencia de 32 eventos registrados, con un promedio de 37 personas muertas por cada evento (Dittmann 1994; Zevin 1994).

En las últimas décadas las pérdidas económicas y humanas asociadas a eventos climáticos han incrementado dramáticamente y han ocurrido con mayor frecuencia (Balbi et ál. 2013; Changnon et ál. 2000; Guha-Sapir, Hoyois y Below 2016). Un importante número de investigadores consideran que este escenario global será cada día más crítico, como consecuencia del incremento en términos de frecuencia o intensidad de los eventos climáticos extremos asociados al calentamiento global (Easterling et ál. 2000; Huntington 2006; Morss et ál. 2011) y del incremento de la exposición de la población e infraestructura a eventos climáticos extremos (Changnon et ál. 2000; Morss et ál. 2011; O'Brien et ál. 2006).

De acuerdo con los antecedentes en Colombia y con el fin de prepararnos para estos escenarios futuros, es de suma importancia establecer adecuadamente el significado de las avenidas torrenciales, entender la distribución espacial y temporal de su ocurrencia, y evaluar las pérdidas asociadas que han generado hasta el momento dichos eventos. En Colombia, de acuerdo con datos extraídos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DesInventar), se han registrado 1.139 avenidas torrenciales entre 1914 y 2018, con un saldo de 3.318 víctimas fatales. Aunque las avenidas torrenciales han sido un fenómeno común en Colombia, los estudios realizados al respecto son escasos. Probablemente una de las razones es la falta de un consenso con respecto a clasificación y

terminología de fenómenos tipo flujos que permita caracterizar adecuadamente qué son las avenidas torrenciales. La literatura técnica en inglés utiliza términos como *flash flood*, *debris flood*, *debris torrent* y *debris flow* para una gran cantidad de fenómenos de mezcla de agua y sedimentos que se transportan a lo largo de un cauce. Entre tanto, en español existen términos como creciente súbita, avenida torrencia y incluso avalanchas para designar este tipo de fenómenos.

En Colombia las avenidas torrenciales son entendidas desde fenómenos gravitacionales tipo movimientos en masa, por parte de profesionales de la geología, hasta fenómenos hidrológicos tipo crecientes súbitas, por parte de profesionales en el campo de la hidrología. Ambas miradas corresponden a fenómenos aparentemente muy diferentes que implican el uso de métodos con enfoques diferenciados. Para evidenciar lo anterior, a continuación se presenta la definición de avenida torrencia por diferentes actores asociados a la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Ingeominas (2001) define las avenidas torrenciales como fenómenos de remoción en masa donde el agua de una corriente aumenta considerablemente su volumen por el transporte de material sólido que ha caído a su cauce desde las laderas adyacentes. La guía para la evaluación de amenazas por Movimientos en Masa en la Región Andina (PMA-GCA y Grupo GEMMA 2007) define las avenidas torrenciales como flujos de detritos de acuerdo con la definición de Hungr et ál. (2001). Por otro lado, en el marco de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas —en adelante, POMCA— las avenidas torrenciales son entendidas como inundaciones de tipo fluvial rápidas o torrenciales. La Guía Técnica para la formulación de los POMCA define las avenidas torrenciales como crecientes súbitas que por las condiciones geomorfológicas de la cuenca están compuestas por un flujo de agua con alto contenido de materiales de arrastre, con un gran potencial destructivo debido a su alta velocidad (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo 2014). El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de la ciudad de Bogotá —en adelante, FOPAE— define las avenidas torrenciales como sinónimo de inundaciones rápidas generadas por crecientes que ocurren de manera repentina, debido a la alta pendiente del río o la quebrada y su cuenca, donde en ocasiones se produce el arrastre de una gran cantidad de material como detritos (FOPAE 2011).

Estas dos miradas (movimientos en masa o crecientes súbitas) han dado como resultado metodologías con enfoques diferentes para evaluar la susceptibilidad o amenaza

ante avenidas torrenciales. En la guía de formulación de los POMCA se propone el uso de índices morfométricos para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca, específicamente el Índice de Vulnerabilidad frente a Eventos Torrenciales (IVET). Por su parte, en las guías que ha elaborado el Servicio Geológico Colombiano —en adelante, SGC— se han propuesto métodos estadísticos para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa sobre las laderas de la cuenca (SGC 2017).

Sin embargo, estas miradas diversas ante un fenómeno similar se pueden explicar no solo como consecuencia de los diferentes enfoques desde la geología y la hidrología, sino además como resultado de la gran variedad de flujos torrenciales que se presentan en nuestro ambiente de acuerdo con su origen, su distribución espacial dentro de la cuenca, su proporción de agua y sedimentos y su granulometría, factores que modifican el comportamiento del flujo.

El presente artículo analiza el impacto de las avenidas torrenciales en Colombia y su distribución espacial y temporal a escala mensual y anual. Adicionalmente, plantea una discusión sobre la definición y clasificación de avenidas torrenciales en nuestro país. Para tal fin, se parte del concepto de flujos de acuerdo con las condiciones locales de nuestro territorio, y el largo historial de eventos que han sido denominados por diferentes autores como avenidas torrenciales, especialmente en la región Andina.

Las avenidas torrenciales en Colombia

Estudios previos

En Colombia los primeros estudios publicados en la región Andina que reportan flujos torrenciales se remontan a finales de la década de los ochenta por Caballero y Mejía (1988) y Flórez y Parra (1988) sobre el evento torrencia del 14 de abril de 1988 en la quebrada La Ayurá del municipio de Envigado (Antioquia). En 1991 la Gobernación de Antioquia, a través de la Sección FOPREVE, realiza un inventario histórico de avenidas torrenciales en Antioquia entre 1930 y 1990 según compilación histórica del Servicio Geológico Regional Noroccidente. Un número importante de eventos fueron descritos por el profesor Hermelin en la década del noventa; entre ellos se destacan: Hermelin, Mejía y Velásquez (1992) sobre el evento del 21 de septiembre de 1990 de la quebrada La Arenosa en el municipio de San Carlos (Antioquia); Hermelin, Curvelo, y Osorio (1992) sobre el evento torrencia del 20 de marzo de 1991

en el río San Francisco en los departamentos de Risaralda y Caldas; y Piedrahita y Hermelin (2005) y Cadavid y Hermelin (2005) sobre los eventos ocurridos en 1993 en el río Tapartó del municipio de Andes (Antioquia) y en el 2000 en el municipio de La Estrella (Antioquia). El Ministerio de Minas y Energía, Ingeominas y la Unidad Operativa de Medellín (1995), así como Parra y Mejía (1996) presentan y describen las avenidas torrenciales del oriente antioqueño y del área de influencia del embalse de Chivor, respectivamente. Finalmente, Caballero (2011) describe y analiza la susceptibilidad por avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá.

Impacto de los flujos torrenciales en los Andes colombianos

Para la evaluación del impacto de las avenidas torrenciales en el territorio colombiano se utilizaron las bases de datos disponibles en el Sistema de Inventario de Efectos de Desastres denominado DesInventar, desarrollado por La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres LA RED, La Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano (OSO) y La Oficina de la Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). En la búsqueda de fenómenos registrados como avenidas torrenciales se identificó un total de 1.358 reportes ocurridos entre 1921 y febrero de 2018, que han dejado un saldo de 3.318 personas fallecidas, 1.264.705 personas afectadas, 13.698 viviendas destruidas y 23.694 afectadas. El total de personas afectadas por eventos de avenida torrenciales corresponde al 2,5% de la población colombiana para el 2018 (DANE 2018). Aunque solo se cuenta con registro de pérdidas económicas en tan solo el 4,9% del total de eventos, principalmente los ocurridos en zonas urbanas, las pérdidas económicas registradas son de 32.000 millones de pesos, valor equivalente al 3,5% del PIB del país en el 2017.

La Figura 1 presenta el registro de avenidas torrenciales entre 1920 y 2018 comparado con el número de muertes agregado a escala anual. Los datos señalan un aumento en el tiempo del número de personas muertas a causa de eventos de avenida torrenciales en Colombia. Los valores máximos que sobresalen en la curva de muertes corresponden a eventos que tuvieron un gran impacto en términos de vidas humanas (Tabla 1). Los picos de ocurrencia (1988, 1994, 1999, 2005, 2011, 2013-2017) se correlacionan con episodios del fenómeno ENSO en su fase húmeda, La Niña, reportados por la Administración Atmosférica y del Océano (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (NOAA 2017).

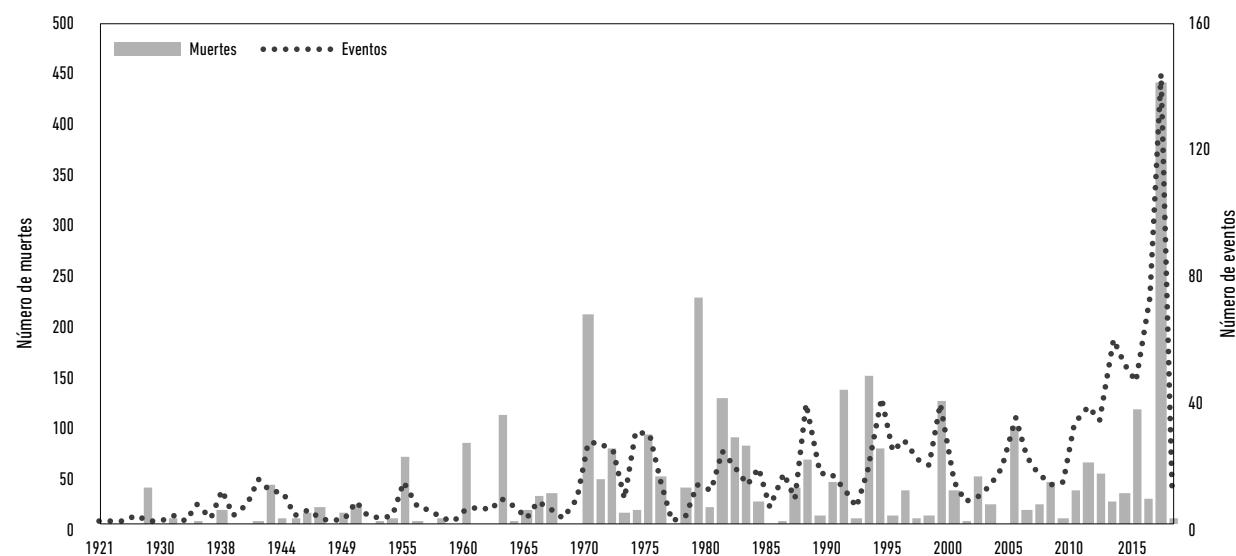


Figura 1. Número de eventos y víctimas fatales asociadas a los eventos de avenidas torrenciales en Colombia para el periodo 1920-2018.

Tabla 1. Los 10 de eventos de avenidas torrenciales más críticos en términos de vidas humanas registrados en Colombia

Fecha evento(d/m/a)	Departamento/Municipio de ocurrencia	Personas fallecidas	Personas desaparecidas	Viviendas afectadas y destruidas
1/04/2017	Putumayo/Mocoa	332	77	1.200
25/11/1979	Santander/El Playón	200		500
18/05/2015	Antioquia/Salgar	93	11	309
8/05/1960	Antioquia/Salgar	80		10
10/11/1970	Cesar/Chiriguaná	60	120	30
26/04/1993	Antioquia/Andes	56		70
18/12/1993	Antioquia/Dabeiba	55	13	196
13/08/1981	Arauca/Saravena	50	41	34
15/04/1963	Boyacá/Paz de Río	50		10
25/01/1972	Norte de Santander/Labateca	50	30	14

Tabla 2. Número de eventos, personas y bienes afectados para cada una de las regiones naturales de Colombia

Región natural	Número de registros	Personas fallecidas*	Personas afectadas**	Viviendas afectadas	Viviendas destruidas
Amazonía	36	458	51.255	2.689	582
Andina	803	1.815	558.386	8.268	9.208
Caribe	126	433	176.924	6.899	2.193
Orinoquía	62	118	284.288	308	87
Pacífico	331	494	193.912	5.530	1.628
Total	1.358	3.318	1.264.705	23.694	13.698

Nota: * Entre las personas fallecidas se incluyen los reportes de muertos y desaparecidos. ** Entre las personas afectadas se incluye heridos, damnificados y afectados.

La Tabla 2 presenta el acumulado del número, fatalidades y personas afectadas, así como el número de viviendas afectadas y destruidas por fenómenos de avenida torrencial para cada una de las regiones de Colombia. Los datos señalan que la región Andina corresponde a la zona más afectada por este tipo de fenómenos, seguido por la región Pacífica y La Orinoquía.

La Figura 2b presenta la distribución intranual de los eventos de avenida torrencial para cada región de Colombia con la precipitación media mensual, evidenciando la relación estrecha entre los regímenes de precipitación de cada región con la ocurrencia de eventos torrenciales.

En la región Andina, donde la lluvia tiene un comportamiento bimodal con temporadas lluviosas en abril-mayo y octubre-noviembre, como consecuencia del doble paso de la zona de convergencia intertropical —en adelante, ZCIT—, el número de eventos de avenidas torrenciales tiene un aumento considerable en estas mismas épocas, presentándose en estos cuatro meses el 58% de todos los eventos reportados en esta región (Figura 2b). En la región Pacífica, aunque es menos acentuado que en la región Andina, el régimen de precipitación también es bimodal, con lluvias ligeramente mayores durante los meses de julio y agosto. Allí la ocurrencia de avenidas torrenciales tiene un comportamiento bimodal más evidente, probablemente debido a que la mayor parte de los reportes se concentran en los departamentos de Valle del Cauca, Nariño y Cauca, ubicados en el Pacífico Sur, donde la influencia del desplazamiento de la ZCIT es mayor. En la región Caribe, la precipitación está marcada por una temporada seca durante los primeros meses del año causada por la posición más al sur de la ZCIT y una temporada lluviosa desde abril hasta noviembre, tendencia seguida por los eventos de avenida torrencial, de los cuales el 91,2% suceden durante esta época. La precipitación en la región de la Orinoquía se encuentra altamente influenciada por el paso de la ZCIT, por lo que muestra un carácter unimodal, con una época seca de diciembre a abril y una de lluvias de mayo a noviembre, periodo en el cual se presenta el 88% de las avenidas torrenciales reportadas en la región. Finalmente, la región de la Amazonía tiene una precipitación de régimen unimodal, la cual muestra una temporada más seca entre junio y agosto, y una temporada lluviosa entre septiembre y mayo, tendencia similar a la de la ocurrencia de eventos de avenida torrencial, de las cuales el 75% ocurrieron en estos meses lluviosos.

La Figura 2c relaciona el número de eventos por área con la densidad poblacional de los departamentos que componen cada una de las regiones. Los datos señalan que los departamentos que presentan mayor densidad poblacional registran un mayor número de emergencias o desastres ocasionados por avenidas torrenciales. Las regiones Andina y Pacífico, que concentran una alta densidad de población, registran igualmente las mayores densidades de eventos. En el caso de la región Caribe, la mayoría de sus departamentos presentan una densidad poblacional mayor a los departamentos de Orinoquía, pero un registro de eventos torrenciales similar, y a su vez densidades poblacionales similares a departamentos de la región Andina, pero con un número de eventos torrenciales mucho menor. Esta tendencia se puede explicar dadas las condiciones topográficas dominantes en la región, las cuales no favorecen la ocurrencia de este tipo de eventos. La excepción, sin embargo, es el departamento de Atlántico cuya densidad poblacional y densidad de eventos son marcadamente grandes, debido a las críticas condiciones asociada a los denominados arroyos en la ciudad de Barranquilla.

Los flujos

Las diferencias entre fenómenos puramente hidrológicos y movimientos en masa están bien establecidas físicamente (Coussot y Meunier 1996; O'Brien y Julien 1985; Pierson y Costa 1987; Takahashi 1981); sin embargo, no existe unanimidad sobre definiciones específicas para flujos torrenciales que contengan una mezcla de agua y sedimentos en proporciones variables. De forma general, los flujos se definen como un fenómeno de transporte de sedimentos compuesto por una mezcla de material fino y grueso con una cantidad variable de agua, donde tanto las fuerzas sólidas como las fluidas influyen fuertemente (Iverson 1997; Nettleton et al. 2005). Según el tipo de proceso dominante y la relación sedimentos-agua, esta mezcla es considerada desde procesos gravitacionales tipo flujo (Cruden y Varnes 1996) hasta procesos hidrológicos tipo inundaciones súbitas (NWS 2005), donde en muchos casos el término flujo hiperconcentrado es utilizado para describir flujos intermedios entre estos dos fenómenos.

A continuación se presentan los criterios propuestos por diferentes autores para diferenciar entre flujos gravitacionales y flujos hidrológicos. Iverson (1997) distingue los procesos gravitacionales como aquellos donde las interacciones entre los fragmentos sólidos

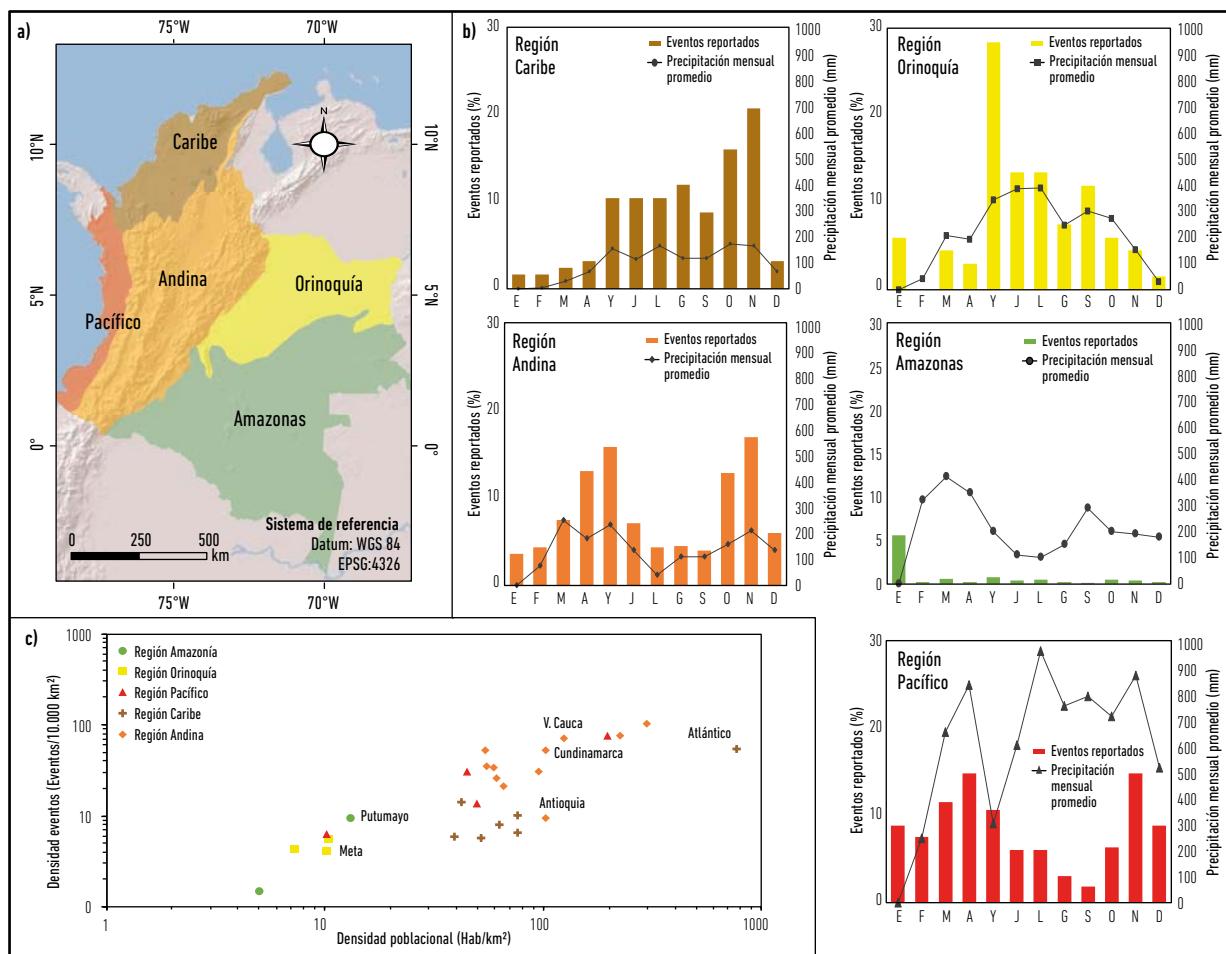


Figura 2. a) Regiones naturales de Colombia; b) distribución intranual de los eventos de avenida torrencial para cada región; c) influencia poblacional en la ocurrencia de flujos torrenciales por región natural.

Nota: en la figura 2b las barras representan el porcentaje de avenidas torrenciales agregado a escala mensual y la línea continua corresponde a la precipitación media mensual.

dominan la transferencia de momento, y las inundaciones cargadas de sedimentos como aquellas donde la turbulencia del fluido domina la transferencia de momento; para casos intermedios usa el término flujos de escombros, donde los sólidos y fluidos deben transferir el momento de forma sinérgica para sostener el movimiento. Takahashi (1981) distingue el transporte de sedimentos entre flujos fluidos y movimientos en masa, porque mientras que en los fluidos las fuerzas de arrastre y levantamiento —dadas por la alta velocidad relativa— son claves para el transporte individual de partículas, en los movimientos en masa, todas las partículas y el fluido intersticial, son movidos por la fuerza de la gravedad, de modo que la velocidad relativa entre la fase sólida y la líquida desempeña un papel menor. En este mismo sentido, Ancey (2001) distingue entre dos regímenes de flujo, flujos de dos fases, donde el

agua es el agente principal y el pequeño porcentaje de sedimentos es transportado como carga de fondo y por suspensión; y flujos de una fase, compuestos por una mezcla altamente concentrada de sedimentos y agua. Sin embargo, Pierson (2005) propone que, además de la concentración de sedimentos suspendidos, la distribución del tamaño de granos y la densidad de los granos se debe utilizar para definir las mezclas sedimento-agua.

Diferentes autores han propuesto límites de concentración en peso y volumen para diferenciar flujos de agua con flujos hiperconcentrados y flujos de escombros. En general, se proponen valores por encima del 30% en volumen para flujos hiperconcentrados y valores por encima del 70% en volumen para flujos gravitacionales (Bradley 1986).

En cuanto a las causas, una gran cantidad de factores han sido descritos como detonantes de flujos torrenciales.

A diferencia de otro tipo de fenómenos de origen natural, como los movimientos en masa, que presentan múltiples factores condicionantes pero un solo factor detonante, las avenidas torrenciales generalmente se presentan como el resultado de un fenómeno en cascada, donde la lluvia siempre juega un papel fundamental, aunque no siempre detonante. Slaymaker (1988) divide los mecanismos detonantes como internos y externos. Los mecanismos externos se refieren a intensos o prolongados eventos de lluvia, sismos, enjambres de avalanchas de escombros o avalanchas de nieve (Miles 1957), rotura de presas naturales y su liberación instantánea (Takahashi 1981), y entre los mecanismos internos Slaymaker (1988) resalta la desestabilización y removilización de los sedimentos del cauce.

Los flujos torrenciales son uno de los principales mecanismos de transporte de sedimentos extremadamente rápidos y en grandes cantidades desde las laderas a los drenajes (Campbell y Church 2003; Miles 1957; Swanston y Swanson 1976), por lo que en la literatura es posible encontrar fenómenos tipo flujos torrenciales en tres tipos de clasificaciones para procesos de transporte de sedimentos:

- Clasificación de procesos gravitacionales (Cruden y Varnes 1996; Hutchinson 1988; Varnes 1978).
- Clasificación de flujos de escombros (O'Brien y Julien 1985)
- Clasificación de inundaciones (Borga et ál. 2014; Pierson y Costa 1987).

A continuación, se describen los fenómenos tipos flujos que presentan cada una de estas clasificaciones.

Clasificación de procesos gravitacionales

Cruden y Varnes (1996) y Varnes (1978) clasifican los procesos gravitacionales de vertiente según el tipo de movimiento y los materiales. En estas clasificaciones, los flujos se definen como un movimiento espacialmente continuo en el que las superficies de cizallamiento son de corta duración, están poco espaciadas y generalmente no se conservan. De acuerdo con el tamaño del material, podrían denominarse flujos de tierra cuando las partículas son menores de 2 mm, o flujos de escombros cuando dominan las partículas de tamaño grueso. Dichos autores restringen el uso del término flujo estrictamente a la fase del movimiento en masa donde el material se deforma ante un esfuerzo continuo, lo cual considera Hungr (2005) demasiado restrictivo, ya que una gran cantidad de movimientos en masa presentan temporalmente una fase donde se comportan como un flujo. Hutchinson

(1988) y Nettleton et ál. (2005) distinguen dos formas de flujos de escombros: flujos de escombros de laderas, que forman su propio camino hacia abajo de las laderas del valle, y los flujos de escombros canalizados que siguen los canales existentes.

Clasificación de flujos de escombros

Crusta et ál. (1990) proponen usar el término flujos de escombros en un significado amplio, dividiéndolos en cuatro categorías: (i) flujos de escombros no canalizados en drenajes de orden cero, originados como desgarres superficiales; (ii) flujos de escombros en cuencas canalizadas de pendientes medias, originados como deslizamientos rotacionales o traslacionales; (iii) avalanchas de escombros en intercuenca de pendientes mayores a 45°; y (iv) torrentes de escombros que se dan inicio en valles estrechos, causados por la falla o ruptura de presas generadas por deslizamientos, flujos de escombros o bloqueos de avalanchas de nieve.

Entre tanto, O'Brien y Julien (1985) proponen una clasificación para flujos de acuerdo con las propiedades controladas por la concentración de sedimentos, cuya clasificación va desde inundaciones hasta movimientos en masa. Los autores identifican cinco categorías de flujos: (i) crecientes, definidas como inundaciones de agua por descargas excesivas donde los sedimentos son transportados a través de suspensión y saltación por el lecho; (ii) inundaciones de lodo, flujos donde la concentración de sedimentos finos varía del 20% al 45% por volumen; (iii) flujos de lodo, donde la concentración de sedimentos finos varía del 45% al 50% por volumen; (iv) flujos de escombros, aplicado a flujos de lodo con más del 50% de sedimentos más gruesos que arena; y (v) deslizamientos, movimientos en masa donde la concentración por volumen de sedimentos es mayor al 50%.

Coussot y Meunier (1996) proponen una clasificación en función de la concentración de sedimentos y el tipo de material, la cual es variable. Se da desde flujos de corriente —donde los sedimentos son transportados por suspensión y carga de fondo— hasta deslizamientos. Como términos intermedios entre estos dos fenómenos se encuentran los flujos hiperconcentrados, flujos de lodo, flujos de escombros y flujos granulares. Iverson (1997) incluye dentro de la categoría de flujos de escombros una gran cantidad de fenómenos como deslizamientos de escombros, torrentes de escombros, inundaciones de escombros, flujos de lodo, deslizamientos de lodo y lahares para flujos de escombros de origen volcánico.

Pierson y Costa (1987) proponen una clasificación de mezclas sedimento-agua basada en la concentración de sedimentos y la velocidad media del flujo, y dividen los flujos en dos tipos diferentes: (i) flujos líquidos aparentes caracterizados por tener pequeñas concentraciones de sedimentos, divididos a su vez en flujos de corriente, para flujos donde el agua es la fase continua, y flujos de corrientes hiperconcentrados, para flujos donde la mezcla de agua y sedimentos presenta un límite elástico medible, pero aún parece fluir como un líquido; y (ii) fluidos plásticos donde hay una mayor concentración de sedimentos, divididos en flujos de lodo y flujos granulares de acuerdo con el tamaño de los sedimentos.

Hungr et ál. (2001) y Hungr, Leroueil, y Picarelli (2014) proponen una clasificación de movimientos en masa tipo flujo, donde incluyen el término inundación súbita como sinónimo de inundación de escombros; lo definen como un flujo de agua muy rápido, fuertemente cargado con detritos en un canal de alta pendiente y un caudal pico comparable a las inundaciones. En estos tipos de flujos el lecho de los cauces puede ser desestabilizado con el transporte masivo de sedimentos que excede el movimiento de fondo normal a través de la suspensión y saltación, pero que aún depende de las fuerzas de tracción del agua. Los autores diferencian los eventos tipo inundación súbita o inundación de escombros de fenómenos tipo flujo de escombros, ya que estos últimos están limitados en canales o drenajes de primer y segundo orden de fuerte pendiente con áreas que alcanzan solo unos pocos km^2 ; en ellos el volumen principal se da por el arranque y arrastre a lo largo de su recorrido, mientras que los eventos tipo inundación súbita, debido al arrastre del agua, pueden ocurrir en cuencas mucho más grandes y los depósitos se extienden sobre distancias mayores y áreas de menores pendientes. Como parte de eventos tipo inundación súbita incluyen los flujos generados por la ruptura repentina de lagos glaciales, denominados *Glacial Lake Outburst Floods* (GLOF).

Otras clasificaciones de mezclas de sedimentos y agua usan el término inundación súbita en un sentido general, para denominar flujos de alta descarga en corrientes que drenan cuencas hidrográficas pequeñas y de fuerte pendiente. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), basado en Crosta et ál. (1990) y Jakob y Hungr (2005), dividen las inundaciones súbitas en tres tipos de flujos: de agua, hiperconcentrados y de escombros. En los flujos de agua, la cantidad de sedimento suspendido es insuficiente para afectar el comportamiento del agua, mientras que en los flujos hiperconcentrados

la cantidad de sedimentos cambia significativamente las propiedades del fluido y los mecanismos de transporte; y los flujos de escombros se consideran cuando la mezcla de agua y sedimentos se convierte en una mezcla capaz de soportar partículas de tamaño grava en suspensión incluso a baja velocidad o estático. Gaume et ál. (2009) utilizan la misma clasificación del USGS para clasificar las inundaciones súbitas que ocurren en Europa, pero proponen usar el término inundación de escombros en lugar de flujos hiperconcentrados.

En cuanto a los flujos tipo torrentes de escombros, considerados por diferentes autores en sus clasificaciones, Aulitzky (1980) los diferencia entre torrentes de flujo de escombros y torrentes de flujo de lodos, donde los torrentes de flujos escombros —considerados como una forma de flujos de escombros canalizados cuando se presentan como resultado de enjambre de movimientos en masa (Sterling y Slaymaker 2007)— corresponden a flujos viscosos no newtonianos con pulsos y velocidades que alcanzan los 30 m/s; asimismo, presenta los torrentes de inundación de escombros como flujos viscosos sin pulsos y que alcanzan velocidades menores y menor capacidad de transporte, que se caracterizan por la ausencia de material fino y la presencia de escombros de origen orgánico y grandes dimensiones (Slaymaker 1988).

Todas estas clasificaciones de mezclas de agua y sedimentos tienen una escala continua de contenido de estos dos materiales que determina el comportamiento del flujo. Sin embargo, no incluyen un término que pueda traducirse literalmente como avenida torrencial. Por el contrario, utilizan diferentes términos como inundación súbita, flujo de escombros, inundación de escombros o torrente de escombros, los cuales son correlacionables a diferentes fenómenos descritos en nuestro país como avenidas torrenciales, lo que refleja la gran diversidad de fenómenos que incluye dicho término.

Clasificación de fenómenos tipo inundaciones

Herrero, Laín-Huerta y Llorente Isidro (2008) definen las avenidas torrenciales como una llegada de caudal desde aguas arriba hacia la posición del observador, que se producen de forma súbita, brusca e impetuosa, características de pequeñas cuencas torrenciales de montañas; y se originan por una gran variedad de factores: precipitaciones intensas y concentradas, orográficas o convectivas, roturas de presas naturales o artificiales, inadecuado funcionamiento de estructuras hidráulicas, o fusión repentina de nieve o hielo inducida por actividad volcánica (lahares).

French y Holt (1989) denominan inundaciones súbitas al resultado de lluvias intensas en áreas pequeñas en un corto periodo de tiempo, generalmente menos de 6 horas, que suben y bajan con bastante rapidez. El Servicio Climático de los Estados Unidos (NWS 2005) define las inundaciones súbitas como una inundación causada por lluvias intensas o excesivas en un corto periodo de tiempo, generalmente menos de 6 horas. La IAHS-Unesco-WMO (1974) define las inundaciones súbitas como una inundación de corta duración con una descarga pico relativamente alta. En Australia, las inundaciones que ocurren en 6 horas o menos después de la lluvia se definen como inundaciones súbitas (BOM 1996). Todas estas definiciones de inundaciones súbitas en las clasificaciones de procesos en cauces tienen en común un inicio rápido y cuencas de tamaños pequeños con pendientes relativamente pronunciadas; sin embargo, no hacen referencia a la concentración de sedimentos provenientes de las laderas o por el aumento de caudal e incremento de la capacidad de arrastre del flujo.

De manera similar, Rozalis et ál. (2010) definieron las inundaciones súbitas como una respuesta hidrológica intensa al exceso de precipitación. Consideran que los factores que afectan la generación de inundaciones súbitas son la lluvia (intensidad, duración, cantidad y distribución espacio-temporal) y las características físicas e hidrológicas de la cuenca (área, longitud, taludes, forma, tipo de suelo y uso de la tierra, vegetación, condiciones antecedentes, y otros). Borga et ál. (2014) definen las inundaciones súbitas como fenómenos creados por precipitaciones cortas de alta intensidad de origen convectivo, espacialmente confinado, que se producen en cuencas de pocos cientos de kilómetros cuadrados o menos, donde el proceso de transferencia de escorrentía predominante es superficial, con altas pendientes como característica morfológica distintiva. Estos mismos autores consideran las inundaciones súbitas y los flujos de escombros como fenómenos separados pero muy relacionados por el factor detonante lluvia, que a menudo ocurren en un mismo evento en diferentes escalas espaciales o temporales.

Clasificación de las avenidas torrenciales en los Andes colombianos

Como se aprecia en las clasificaciones descritas anteriormente, existe una gran cantidad de términos para describir fenómenos de flujos torrenciales formados por la mezcla variada de agua y sedimentos que se transportan a grandes velocidades a lo largo de cauces de montaña.

Para muchos autores, lo que ocurre en realidad en la naturaleza es un continuo entre inundaciones súbitas, flujos hiperconcentrados y flujos de escombros, por lo que los límites entre estos tipos de flujos no son tajantes. Un evento hidrológico puede consistir en varios procesos en diferentes puntos a lo largo del camino de flujo y los diferentes momentos durante el mismo evento (Borga et ál 2014; Costa 1988; Jakob y Hungr 2005; O'Brien y Julien 1985).

En el ámbito local, la gran cantidad de tipos de eventos torrenciales, dada por la diversidad geológica y geomorfológica de Colombia, y la falta de consenso entre las diversas definiciones, ha causado que el tema se trate desde diversas aproximaciones, en ocasiones contradictorias y sin llegar a un acuerdo sobre el análisis, el diagnóstico y las medidas de reducción del riesgo. Se propone a continuación, con base en el estado del arte y la observación de los diferentes tipos de eventos torrenciales ocurridos en el Colombia, una descripción y clasificación que permita diferenciar los diversos tipos de eventos torrenciales, en un rango continuo entre procesos de tipo gravitacional e hidrológico, agrupándolos todos en el término general, de uso común entre la comunidad científica de “avenida torrencial”.

En cuencas de ambientes tropicales y zonas de montaña, como Colombia, las precipitaciones cortas e intensas generan una rápida concentración del flujo en la red de drenajes dando lugar un flujo torrencial definido como inundaciones súbitas. Este tipo de eventos suceden comúnmente en cuencas de tamaños pequeños con pendientes relativamente pronunciadas y se caracterizan por una cantidad insuficiente de sedimentos para afectar el comportamiento del agua, la cual comúnmente contiene sedimentos finos en suspensión, aunque la mayoría de ellos se transportan cerca del lecho. Según Pierson (2005) la carga de fondo puede contener material hasta tamaño grava. Aunque las inundaciones súbitas son fenómenos potencialmente dañinos, son los fenómenos torrenciales de menor capacidad destructiva y se presentan en Colombia con una alta frecuencia ante episodios de precipitación intensa.

También es común la ocurrencia de flujos torrenciales tipo inundación de escombros a partir de inundaciones súbitas y el desplazamiento de grandes volúmenes de agua a lo largo del cauce, que aumenta su poder de erosión y su capacidad de transporte y removilización de los sedimentos del lecho, con la posible conjunción de deslizamientos o colapsos de la banca a pequeña escala, que al unirse al flujo aumentan su volumen y concentración de sedimentos (Jakob y Hungr 2005). Estos eventos son

definidos por Hungr et ál. (2001) como eventos torrenciales con velocidades y descargas pico similares a aquellas de las inundaciones súbitas, pero que por su alta velocidad adquieren el poder de transportar una cantidad de sedimento similar a los eventos tipo flujo de escombros canalizados, pero con bloques de tamaños menores. En dichos eventos los sedimentos se transportan como carga de fondo y, dado que el flujo tiene la capacidad de moverse por una mayor trayectoria y por canales de menor pendiente, pueden suceder en cuencas de mayor área. Este tipo de avenidas torrenciales, denominadas inundación de escombros, dan como resultado depósitos aluvio-torrenciales caracterizados por la presencia de bloques de tamaños heterogéneos poco redondeados, sin imbricación o estratificación horizontal y gradación normal de bloques, embebidos en una matriz arenosa.

En algunos casos los eventos intensos de lluvias, además de generar flujos torrenciales tipo inundaciones súbitas e inundaciones de escombros como se describió anteriormente, sobrepasan umbrales críticos de estabilidad de laderas establecidos por la naturaleza de acuerdo con la geometría y propiedades geomecánicas de los materiales, desencadenando sobre las vertientes de dichas cuencas un enjambre de movimientos en masa, especialmente sobre laderas conformadas por suelos de textura arenosa y alta permeabilidad. Este enjambre de movimientos en masa sobre las laderas es definido por Crozier (2005) como eventos masivos de movimientos en masa de ocurrencia regional (MORLE, por sus siglas en inglés), los cuales inicialmente corresponden a movimientos en masa tipo flujos, definidos por Hungr, Leroueil y Picarelli (2014) como avalancha de escombros o flujos de escombros en ladera. En este tipo de eventos, los movimientos en masa pueden suministrar gran cantidad de sedimentos al drenaje, aumentando la concentración de sedimentos y alterando las propiedades del fluido (O'Brien y Julien 1985). Este proceso transforma las inundaciones de escombros en una mezcla variable de agua y sedimentos que puede transformarse a flujos de escombros canalizados, a medida que aumenta la concentración de sólidos en el flujo. Se caracterizan por tener descargas pico muy superiores a los eventos de inundación súbita extremos, lo cual les confiere un poder destructivo importante (Hungr et ál. 2014). De este tipo de avenidas torrenciales, definidas como flujos de escombros canalizados, se destacan en Colombia casos como la cuenca La Arenosa en San Carlos (Antioquia) en 1990, la cuenca del río Tapartó en el municipio de Andes (Antioquia) en 1993,

la quebrada La Liboriana en Salgar (Antioquia) en el 2015, y el municipio de Mocoa (Putumayo) en el 2017. Todos estos eventos se caracterizan por un gran número de víctimas fatales (García-Delgado, Machuca y Medina 2019; Hermelin, Mejía y Velásquez 1992; Piedrahita y Hermelin 2005), no solo por las altas velocidades que alcanzan dichos flujos, sino por los volúmenes extraordinarios que superan los niveles máximos de eventos tipo inundaciones súbitas o inundaciones de escombros.

En algunas avenidas torrenciales tipo flujo de escombros canalizados, la ocurrencia de los movimientos en masa sobre las laderas no se presenta por el evento de lluvia, sino por un sismo como factor detonante. Adicionalmente, se han reportado avenidas torrenciales tipo flujo de escombros canalizados originados por lluvias acumuladas de los días anteriores al evento, es decir, sin la presencia de lluvias intensas las veinticuatro horas previas a la ocurrencia del evento. Estas avenidas torrenciales se desencadenan como movimientos en masa profundos y grandes volúmenes en condiciones saturadas, lo cual les permite alcanzar el cauce y aumentar el porcentaje en volumen de agua para desplazarse a grandes velocidades y largos trayectos a lo largo del cauce.

Flujos de tipo torrencial también han sido reportados como resultado de la ruptura súbita de presas naturales originadas por movimientos en masa en valles estrechos. También es posible este tipo de eventos por la construcción de estructuras hidráulicas con secciones insuficientes, lo que genera el represamiento más la acumulación de sedimentos y material vegetal que falla súbitamente, aumentando el caudal instantáneo del flujo y, por ende, su capacidad de destrucción. Estos tipos de avenidas torrenciales varían ampliamente en la cantidad y tipo de sedimentos transportados; por lo tanto, pueden dar como resultado flujos torrenciales tipo inundaciones de escombros o flujos de escombros canalizados, de acuerdo con la proporción de sedimentos.

De acuerdo con los anteriores procesos geomorfológicos descritos en nuestro territorio y que dan lugar a avenidas torrenciales, este tipo de fenómenos no deben considerarse estrictamente como movimientos en masa o inundaciones, en realidad corresponden a fenómenos intermedios entre proceso gravitacionales y procesos hidrológicos, donde el origen, la concentración y características de los sedimentos controla el comportamiento del flujo. La descripción que más se ajusta a los procesos denominados localmente como avenidas torrenciales corresponde a una de las primeras definiciones de flujos de escombros realizada por Stiny (1910) donde los

describe como fenómenos que inician como una inundación en torrentes de montaña, con una importante carga de sedimentos de fondo y en suspensión, y que, de acuerdo con el incremento en el volumen de sedimentos, cambia a una masa viscosa de agua, sedimentos y madera mezclados. En esta misma dirección Hungr (2005) propone utilizar el término flujo de escombros para cubrir un rango amplio de flujos, que incluyen los fenómenos iniciales de origen gravitacional en las laderas de la cuenca, que aportan una gran cantidad de sedimentos a los cauces de montaña, y que se transforman a flujos rápidos a lo largo de cauces confinados de fuerte pendiente, que terminan depositándose como abanicos. En conclusión, los términos avenida torrencia y flujo de escombros representan un proceso amplio que va desde la ocurrencia de movimientos en masa en las laderas, hasta los diferentes flujos que se presentan a lo largo de los cauces de montaña, de acuerdo con la concentración de agua y sedimentos.

Esta distinción es importante desde lo práctico, ya que implica que los métodos de evaluación de la susceptibilidad y amenaza para avenidas torrenciales no corresponden a las aproximaciones clásicas utilizadas desde la modelación hidrológica e hidráulica, o la estabilidad de laderas. Considerando la dinámica compleja entre las vertientes y el cauce que da origen a las avenidas torrenciales, los métodos más apropiados deben tener en cuenta las interconexiones y los efectos concatenados (Perles Roselló et al. 2019; Perles y Cantarero 2010). En este caso, a partir de la evaluación de la respuesta hidrológica de la cuenca, combinado con el análisis del potencial aporte de sedimentos de las laderas de la cuenca, y el tránsito hidráulico de la mezcla de agua y sedimento resultante.

La Tabla 3 presenta un análisis entre los diferentes flujos torrenciales que permiten clasificar las avenidas torrenciales. Debido al amplio rango de características que presentan dichos fenómenos y sus límites difíciles de establecer, se presentan en general las características comparativas entre ellos, y que, en alguna medida, aportan criterios para su identificación, resaltando que una sola avenida torrencia presenta generalmente diferentes tipos de flujos torrenciales, a lo largo de su desarrollo espacial en la cuenca, y la evolución temporal del flujo.

Flujos no torrenciales

Existe una cantidad de fenómenos de transporte de sedimentos en cuencas de montaña y ambientes tropicales que deben ser diferenciados de fenómenos tipo avenidas

torrenciales. El primero de ellos se refiere a los flujos de escombros canalizados. Aunque algunas avenidas torrenciales corresponden a flujos de escombros canalizados, no todos estos eventos pueden ser considerados avenidas torrenciales. En algunos casos los flujos de escombros canalizados se presentan por movimientos en masa profundos de forma individual y no como enjambre de movimientos. Aunque este tipo de flujos se pueden propagar por distancias considerables a lo largo de un cauce, su alcance y velocidad generalmente es reducido, comparado con fenómenos tipo avenidas torrenciales. En este tipo de eventos, aunque la lluvia antecedente y humedad del suelo juega un papel fundamental, no requieren la ocurrencia de un evento de lluvia detonante, por lo que no se presenta acompañada de una inundación súbita.

El término avalancha, usado ampliamente por la comunidad, no aplica al fenómeno conocido como avenida torrencia. El término avalancha es propuesto por Hungr et ál. (2001) para flujos de roca fragmentada, resultado de grandes y extremadamente rápidos deslizamientos de roca. Para los casos cuando las laderas están conformadas por material no consolidado se presentan flujos superficiales, para los cuales Hungr, Leroueil y Picarelli (2014) recomiendan utilizar el término avalancha de escombros. En ambos tipos de avalancha no se presenta confinamiento en un canal establecido, característica fundamental de una avenida torrencia. Sin embargo, los movimientos en masa tipo avalancha de escombros se presentan como enjambre durante fuertes tormentas o sismos, dando como resultado avenidas torrenciales tipo flujo de escombros canalizados o inundaciones de escombros.

Conclusiones

Las avenidas torrenciales son uno de los fenómenos amenazantes de origen natural de mayor capacidad destructiva como consecuencia de los reducidos tiempos de respuesta. Debido a sus condiciones geológicas, topográficas e hidrometeorológicas, Colombia ha sido golpeada por este tipo de eventos, con un registro de 1.358 avenidas torrenciales que han dejado un saldo de 3.318 muertos y más de un millón de habitantes afectados. La región Andina, como consecuencia de sus condiciones fisiográficas y poblacionales, presenta el mayor número de eventos, con el 59% de registros y el 55% de víctimas. La distribución temporal de la ocurrencia de avenidas torrenciales señala la estrecha relación de dichos fenómenos con las condiciones de lluvia de nuestras regiones y eventos ENSO es su fase La Niña.

Tabla 3. Análisis comparativo entre flujos denominados como avenidas torrenciales

Característica Tipo de Evento	Creciente súbita	Flujo de escombros	Inundación de escombros
Velocidad	Alta	Muy alta	Alta
Descarga pico	Alta	Muy alta	Alta
% sedimentos vol.	0%-30%	>70%	30%-70%
Aporte de sedimentos	Cauce	Laderas y cauce	Cauce y laderas
Tamaño de sedimento	Hasta tamaños centimétricos	Muy heterogéneo en tamaños hasta bloques métricos	Hasta bloque métricos
Reología del flujo	Flujo newtoniano de dos fases	Flujo de una fase no newtoniano	Flujo de dos fases
Tipo de transporte	Turbulencia	Fuerzas dispersivas, matriz cohesiva y boyancia	Fuerzas dispersivas y boyancia
Alcance espacial	Mayor	Menor	Medio
Orden drenaje	>2	1 y 2	>2
Morfología de cuenca	Cuencas más grandes y de menores pendientes	Cuencas pequeñas, laderas de mayores pendiente y cauces confinados	Cuencas más grandes y de menores pendientes
Capacidad de destrucción	Medio	Muy alto	Alto

Aunque las avenidas torrenciales son un fenómeno común en nuestro territorio, no existe unanimidad sobre su definición, por lo cual es difícil proponer una metodología para la evaluación de la amenaza. En el presente trabajo, basados en el estado del arte y los diferentes eventos reportados en nuestro territorio y especialmente en la región Andina, se propone el uso del término avenidas torrenciales para flujos formados por una mezcla de sedimentos y agua en diferentes proporciones, que se desplaza a grandes velocidades a lo largo de cauces en cuencas de montaña, y que tienen como causas detonantes la presencia de uno o varios de los siguientes eventos: lluvias concentradas intensas o lluvias antecedentes; enjambre de movimientos en masa; sismos; rotura de presas naturales o artificiales; o aporte de grandes volúmenes de agua por deshielo. Como resultado de las diversas causas detonantes y la reología del flujo, asociada a la proporción agua-sedimentos y el tamaño de los sedimentos, existen diferentes tipos de avenidas torrenciales: (i) flujos de escombros canalizados, (ii) inundación de escombros e (iii) inundaciones súbitas. Sin embargo en un evento torrencial se puede presentar una combinación de diferentes tipos de avenidas torrenciales a través de su tiempo de desarrollo y a lo largo del espacio por el que se propaga; por lo tanto, no existen límites tajantes entre estos. No se recomienda el uso del término avalancha para denominar este tipo de fenómenos, ya que las avalanchas corresponden a flujos en laderas no canalizados; y una condición

fundamental para las avenidas torrenciales es que se presentan a lo largo de cauces definidos.

Referencias

- Alfieri, Lorenzo, Peter Salamon, Florian Pappenberger, Fredrik Wetterhall, y Jutta Thielen. 2012. "Operational Early Warning Systems for Water-Related Hazards in Europe." *Environmental Science and Policy* 21 (August): 35-49. doi: 10.1016/j.envsci.2012.01.008.
- Ancey, Christophe. 2001. "Debris Flows and Related Phenomena." En *Geomorphological Fluid Mechanics*, editado por N. J. Balmforth y A. Provenzale, 528-547. Nueva York: Springer.
- Aulitzky, Herbert. 1980. Derzeitige "Sicherheit Erwartungen an Verschiedene Lawinenschutzmassnahmen." En *Proc Int. Symposium Interpraevent*, Bad Ischl/Oesterreich, Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, Klagenfurt, Band 4, 33-48.
- Balbi, Stefano, Carlo Giupponi, Roland Olschewski, y Vahid Mojtabah. 2013. "The Economics of Hydro-Meteorological Disasters: Approaching the Estimation of the Total Costs." *BC3 Working Paper Series 2013-12*, no. August. doi: 10.2139/ssrn.2317437.
- Barredo, José I. 2007. "Major Flood Disasters in Europe: 1950-2005." *Natural Hazards* 42 (1): 125-148. doi: 10.1007/s11069-006-9065-2.
- BOM (Bureau of Meteorology). 1996. *Policy on the Provision of the Flash Flood Warning Service*. Australian Government.
- Borga, Marco, Markus Stoffel, Francesco Marra, Lorenzo Marchi, Francesco Marra, y Matthias Jakob. 2014. "Hydro-

- geomorphic Response to Extreme Rainfall in Headwater Systems: Flash Floods and Debris Flows." *Journal of Hydrology* 518 (B): 194-205. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.022.
- Bradley, J. B. 1986. "Hydraulics and Bed Material Transport at High Fine Suspended Concentrations." Tesis de Doctorado, Colorado State University, Fort Collins.
- Caballero Acosta, José Humberto. 2011. "Las Avenidas Torrenciales : una amenaza potencial en el Valle de Aburrá." *Gestión y Ambiente* 14 (3): 45-50.
- Caballero Acosta, José Humberto, e Isabel Mejía Pelaez. 1988. "Algunos comentarios acerca del evento torrencial de La Quebrada Ayurá, Envigado, del 14-04-88 y sus implicaciones en la evaluación de la amenaza al municipio." Conferencia presentada en *Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá*, Medellín, Colombia, 3 al 6 de agosto.
- Cadavid, M. F, y M. Hermelin. 2005. "El evento del 29 y 30 de mayo de 2000 en la Estrella y Sabaneta (Antioquia)." En *Desastres de Origen Natural en Colombia 1979-2004*, editado por OSO y Universidad Eafit. Medellin: Universidad Eafit.
- Campbell, David, y Michael Church. 2003. "Reconnaissance Sediment Budgets for Lynn Valley, British Columbia: Holocene and Contemporary Time Scales." *Canadian Journal of Earth Sciences* 40 (5): 701-713. doi: 10.1139/e03-012.
- Changnon, Stanley A., Roger A. Pielke Jr., David Changnon, Richard T. Sylves, y Roger Pulwarty. 2000. "Human Factors Explain the Increased Losses from Weather and Climate Extremes." *Bulletin of the American Meteorological Society* 81 (3): 437-442. doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<0437:HFETIL>2.3.CO;2.
- Costa, J. E. 1988. "Rheologic, Geomorphic, and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hyperconcentrated Flows, and Debris Flows." En *Flood Geomorphology*, editado por V. R. Baker, R. C. Kochel y P. C. Patton, 113-122. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Coussot, P, y M. Meunier. 1996. "Recognition, Classification and Mechanical Description of Debris Flows." *Earth-Science Reviews* 40 (3-4): 209-227. doi: 10.1016/0012-8252(95)00065-8.
- Crosta, G., F. Guzzetti, M. Marchetti, y P. Reichenbach. 1990. "Morphological Classification of Debris-Flow Processes in South-Central Alps (Italy)." *Actas del VI International Congress IAEG, 1565-1572*, Ámsterdam, 6 al 10 de agosto.
- Crozier, M. J. 2005. "Multiple-Occurrence Regional Landslide Events in New Zealand: Hazard Management Issues." *Landslides* 2 (4): 247-256. doi: 10.1007/s10346-005-0019-7.
- Cruden, David M., y D. J. Varnes. 1996. "Landslide Types and Processes, Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences." *Special Report - National Research Council, Transportation Research Board* 247: 36-75.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2018. "Reloj de Población." Consultado el 18 de junio de 2018. <http://www.dane.gov.co/reloj/>
- DesInventar.org. 2016. *Sistema de inventarios de efectos de desastres*. Consultado el 18 de junio de 2018. <http://www.desinventar.org/>
- Dittmann, Richard H. 1994. "Annual Flood Death Statistics Per State Per Capita for the United States and Puerto Rico During the Period 1959-1991." *NOAA Technical Memorandum NWS SR 153*. Consultado el 20 de abril de 2018. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/7259>
- Doocy, Shannon, Amy Daniels, Sarah Murray, y Thomas D. Kirsch. 2013. "The Human Impact of Floods: A Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review." *PLOS Currents Disasters*, no. 16 (Abril). doi: 10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a.
- Easterling, David R., Gerald A. Meehl, Camille Parmesan, Stanley A. Changnon, Thomas R. Karl, y Linda O. Mearns. 2000. "Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts." *Science* 289 (5487): 2068-2074. doi: 10.1126/science.289.5487.2068.
- Florez, María Teresa, y Luis Norberto Parra. 1988. "Avalancha de La Quebrada Ayurá del 14 de Abril de 1988." Conferencia presentada en *Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá*, Medellín, Colombia, 3 al 6 de agosto.
- FOPAE (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias). 2011. *Cartilla básica de SAT (Sistemas de Alerta Temprana) ante inundaciones*. Bogotá: FOPAE.
- French, J. G., y K. W. Holt. 1989. "Floods." En *The Public Health Consequences of Disasters*, editado por M. N. Gregg. 69-78. Atlanta, Georgia: US Department of Health and Human Services, Public Health Service, CDC.
- García-Delgado, Helbert, Silvia Machuca, y Enif Medina. 2019. "Dynamic and Geomorphic Characterizations of the Mocoa Debris Flow (March 31, 2017, Putumayo Department, Southern Colombia)." *Landslides* 16 (3): 597-609. doi: 10.1007/s10346-018-01121-3.
- Gaume, Eric, Valerie Bain, Pietro Bernardara, Olivier Newinger, Mihai Barbuc, Allen Bateman, Lotta Blaškovičová, Günther Blöschl, Marco Borga, Alexandru Dumitrescu, Ioannis Daliakopoulos, Joachim Garcia, Anisoara Irimescu, Silvia Kohnova, Aristeidis Koutoulis, Lorenzo Marchil, Simona Matreata, Vicente Medina, y Alberto Viglione. 2009. "A Compilation of Data on European Flash Floods." *Journal of Hydrology* 367 (1-2): 70-78. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.
- Guha-Sapir, Debarati, Philippe Hoyois, y Regima Below. 2009. *EM_DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database*. Université Catholique de Louvain: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).

- Guha-Sapir, Debarati, Philippe Hoyois, y Regina Below. 2016. *Annual Disaster Statistical Review 2015: The Numbers and Trends*. Bruselas: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Institute of Health and Society (IRSS), Université Catholique de Louvain.
- Hermelin, Michel, C. A. Curvelo, y V. L. Osorio. 1992. "Fenómenos asociados al aguacero del 27 de junio de 1992 en la Cuenca del río San Francisco." *Memorias de la II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental II*: 147-176.
- Hermelin, Michel, Óscar Mejía, y R. Elkin Velásquez. 1992. "Erosional and Depositional Features Produced by a Convulsive Event, San Carlos, Colombia, September 21, 1990." *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 45 (1): 89-95.
- Herrero, Andrés Díez, Luis Laín-Huerta, y Miguel Llorente Isidro. 2008. *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Hungr, Oldrich. 2005. "Classification and Terminology." En *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, editado por Oldrich Hungr y Matthias Jakob, 795. Nueva York: Springer.
- Hungr, Oldrich, S. G. Evans, M. J. Bovis, y J. N. Hutchinson. 2001. "A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type." *Environmental and Engineering Geoscience* 7 (3): 221-238. doi: 10.2113/gsegeosci.7.3.221.
- Hungr, Oldrich, Serge Leroueil, y Luciano Picarelli. 2014. "The Varnes Classification of Landslide Types, an Update." *Landslides* 11 (2): 167-194. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- Huntington, Thomas G. 2006. "Evidence for Intensification of the Global Water Cycle: Review and Synthesis." *Journal of Hydrology* 319 (1-4): 83-95. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.003.
- Hutchinson, John H. 1988. "General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology; Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, Lausanne, 10-15 July." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 26 (2): 88. doi: 10.1016/0148-9062(89)90310-0.
- IAHS-Unesco-WMO (International Hydrology Prize, Naciones Unidas, World Meteorological Organization). 1974. *Flash Floods: Proceeding of the Paris Symposium*, no. 112, septiembre. París.
- Ingeominas. 2001. *Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún, escala 1:100.000. Memoria Explicativa*. Sincelejo: Ingeominas.
- Iverson, Richard M. 1997. "The Physics of Debris Flows." *Reviews of Geophysics* 35 (3): 245-296. doi: 10.1029/97RG00426.
- Jakob, Matthias, y Oldrich Hungr. 2005. *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Nueva York: Springer.
- Jonkman, S. N. 2005. "Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods." *Natural Hazards* 34 (2): 151-175. doi: 10.1007/s11069-004-8891-3.
- Koutroulis, Aristeidis G., e Ioannis K. Tsanis. 2010. "A Method for Estimating Flash Flood Peak Discharge in a Poorly Gauged Basin: Case Study for the 13-14 January 1994 Flood, Giofiros Basin, Crete, Greece." *Journal of Hydrology* 385 (1-4): 150-164. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.02.012.
- Marchi, L., M. Borga, E. Preciso, y E. Gaume. 2010. "Characterisation of Selected Extreme Flash Floods in Europe and Implications for Flood Risk Management." *Journal of Hydrology* 394 (1-2): 118-133. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.017.
- Miles, J. W. 1957. "Generation of Surface Waves by Shear Flow Instability." *Journal of Fluid Mechanics* 739: 276-307. doi: 10.1017/jfm.2013.61.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. 2014. *Guía técnica para la formulación de los POMCAS*. no. 104. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo.
- Ministerio de Minas y Energía, Ingeominas, y Unidad Operativa de Medellín. 1995. *Evaluación de la torrencialidad y zonas desprovistas de vegetación en el área de influencia de los embalses de Punchina, Tafetanes, Calderas y San Lorenzo*. Consultado el 10 de enero de 2018. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B2/11003010011040/documento/pdf/0101110401102000.pdf>.
- Morss, Rebecca E., Olga V. Wilhelmi, Gerald A. Meehl, y Lisa Dilling. 2011. "Improving Societal Outcomes of Extreme Weather in a Changing Climate: An Integrated Perspective." *Annual Review of Environment and Resources* 36: 1-25. doi: 10.1146/annurev-environ-060809-100145.
- Nettleton, I. M., S. Martin, S. Hencher, y R. Moore. 2005. "Debris Flow Types and Mechanisms." En *Scottish Road Network Landslides Study*, editado por M. G. Winter, F. Macgregor y L. Shackman, 25-44. The Ecottish Executive. Consultado el 17 de noviembre de 2017. <https://www2.gov.scot/resource/doc/55971/0015351.pdf>
- NOAA. 2017. "El Niño / Southern Oscillation (ENSO)." Consultado el 17 de noviembre de 2017. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- NWS (National Weather Service). 2005. *National Weather Service Glossary*. Consultado el 18 de junio de 2018. <https://w1.weather.gov/glossary/>
- O'Brien, Geoff, Phil O'Keefe, Joanne Rose, y Ben Wisner. 2006. "Climate Change and Disaster Management." *Disasters* 30 (1): 64-80. doi: 10.1111/j.1467-9523.2006.00307.x.
- O'Brien, J. S., y P. Y. Julien. 1985. "Physical Properties and Mechanics of Hyperconcentrated Sediment Flows." Conferencia presentada en el *Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris Flow Hazards in Utah*, 260-280. Utah State University, Logan, UT.
- Parra, E., y I. Mejía. 1996. *Evaluación de la torrencialidad en las cuencas de influencia del Embalse de Chivor, Boyacá*. Medellín: Ingeominas.

- Perles Roselló, María Jesús, y F. Cantarero. 2010. "Problemas y retos en el análisis de elaboración de cartografías multi-peligros." *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 52, 245-272.
- Perles Roselló, María Jesús, Santiago Manuel Pardo García, Matías Mérida Rodríguez, y Jorge Olcina Cantos. 2019. "Metodología Para La Predicción de Puntos de Riesgos Múltiples En Infraestructuras Viarias Tras Episodios Torrenciales (Road-Risk)." *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 80 (2615): 1-40. doi: 10.21138/bage.2615.
- Piedrahita, I., y M. Hermelin. 2005. "La avenida torrencia del río Tapartó Antioquia de 1993." En *Desastres de Origen Natural En Colombia 1979-2004*, editado por Universidad Eafit, 109-120. Medellin: Universidad Eafit.
- Pierson, Thomas C. 2005. "Distinguishing between Debris Flows and Floods from Field Evidence in Small Watersheds." *USGS Science for a Changing World*. Consultado el 7 de noviembre de 2017. <https://web.archive.org/web/20090305043832/http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/FS2004-3142/FS2004-3142.pdf>
- Pierson, Thomas C., y John E Costa. 1987. "A Rheologic Classification of Subaerial Sediment-Water Flows." En *Debris Flows - Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*, editado por John E. Costa y Gerald E. Wieczorek, 1-12. doi: 10.1130/REG7-p1.
- PMA-GCA, y Grupo GEMMA. 2007. "Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas." *Geológica Multinacional*, no. 4. Consultado el 7 de noviembre de 2017. <https://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/442884/GuiaEvaPeligros.pdf>
- Rozalis, Shahar, Efrat Morin, Yoav Yair, y Colin Price. 2010. "Flash Flood Prediction Using an Uncalibrated Hydrological Model and Radar Rainfall Data in a Mediterranean Watershed under Changing Hydrological Conditions." *Journal of Hydrology* 394 (1-2): 245-255. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.021.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). 2017. *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por dirección de geoamenazas*. Bogotá: SGC.
- Slaymaker, Olav. 1988. "The Distinctive Attributes of Debris Torrents." *Hydrological Sciences Journal* 33 (6): 567-573. doi: 10.1080/02626668809491290.
- Sterling, Shannon, y Olav Slaymaker. 2007. "Lithologic Control of Debris Torrent Occurrence." *Geomorphology* 86 (3-4): 307-319. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.09.002.
- Stiny, Josef. 1910. *Die Muren : Versuch einer Monographie mit besonderer berücksichtigung der verhältnisse in Den Tiroler Alpen*. Innsbruck: Wagner.
- Swanson, Douglas N., y Frederick J. Swanson. 1976. "Timber Harvesting, Mass Erosion y Steepland Forest Geomorphology." *Geomorphology and Engineering*, editado por D. R. Coates, 199-221. Stroudsburg PA: Hutchinson & Ross.
- Takahashi, T. 1981. "Debris Flow." *Annual Review of Fluid Mechanics* 13: 57-77. doi: 10.1146/annurev.fl.13.010181.000421.
- Varnes, D. J. 1978. "Slope Movement Types y Processes." En *Landslides: Analysis and Control* *Transportation Research Board*, editado por R. L. Schuster y R. J. Krizek, Special Report no. 176, 11-33.
- Zevin, Susan F. 1994. "Steps toward an Integrated Approach to Hydrometeorological Forecasting Services." *Bulletin of the American Meteorological Society* 75 (7): 1267-1276. doi: 10.1175/1520-0477-75.7.1267.

Edier Aristizábal

Ingeniero geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Especialista en Evaluación y Gestión de Riesgos Geológicos y Eventos Asociados con el Clima de la Universidad de Ginebra (Suiza). Magíster en Ciencias e Ingeniería de la Shimane University (Matsue, Japón). Doctor en Ingeniería - Aprovechamiento de recursos hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Es docente del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Investigador en temas de geomorfología, hidrología y evaluación de amenazas geológicas.

María Isabel Arango Carmona

Ingeniera geóloga de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Especialista en Evaluación y Gestión de Riesgos Geológicos y Eventos Asociados con el Clima de la Universidad de Ginebra (Suiza). Especialista en gestión del riesgo de desastres del Colegio Mayor de Antioquia. Contratista en proyectos de extensión del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas. de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Investigadora de temas de modelación y simulación de amenazas hidrogeológicas y gestión del riesgo.

Ingrid Kattherine García López

Ingeniera geóloga de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Especialista en Gestión del Riesgo de Desastres del Colegio Mayor de Antioquia. Ingeniera geóloga en SAG S. A. Investigadora de temas de geotecnia y gestión del riesgo.