



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de las condiciones geomorfológicas y de precipitación detonantes de eventos torrenciales en cuencas del departamento de Antioquia

Laura Rodríguez Martínez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2023

Análisis de las condiciones geomorfológicas y de precipitación detonantes de eventos torrenciales en cuencas del departamento de Antioquia

Laura Rodríguez Martínez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D. Nicolás Velásquez Girón

Codirector:

M.Sc. Luis Fernando Carvajal Serna

Línea de Investigación:

Planificación de recursos hidráulicos, amenazas naturales, gestión del riesgo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2023

A mis padres...

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Laura Rodríguez Martínez

Fecha 01/08/2023

Agradecimientos

A mis padres, por su amor, su apoyo y su comprensión para terminar este proceso satisfactoriamente. A mi hermano, mis abuelas y mi familia por estar en cada parte de este largo camino.

A mi director, Nico, ¡por no abandonar este barco!, por sus valiosas enseñanzas, su dedicación y motivación para seguir y persistir. Al profe Nacho, con quien inicié este proceso, por estar siempre presente, por su apoyo y sus consejos de vida. Al profe Carvajal, mi codirector, por sumarse, por su dedicación y sus valiosos aportes.

A Manuel, por su apoyo, comprensión y compañía en cada momento. A Moni y Eli, amigas para la vida que me dejó este camino, por su motivación y acompañamiento cada día. A Sebas Gómez por su interés y aportes valiosos. A todos los amigos del bloque M2 y de la vida que estuvieron presentes y vivieron este proceso conmigo.

A SIATA y al Semillero de investigación Geohazards de la Facultad de Minas, quienes aportaron información para el desarrollo de esta investigación.

A la vida, por ponerme en este sitio, por cada decisión tomada durante el camino. Por enseñarme que los esfuerzos valen la pena. Culminar este proceso ha sido una decisión, de las más importantes y ¡qué gran satisfacción haberlo hecho!

Resumen

Análisis de las condiciones geomorfológicas y de precipitación detonantes de eventos torrenciales en cuencas del departamento de Antioquia

Las avenidas torrenciales son una de las principales amenazas naturales a nivel mundial. Estos eventos son generados por una combinación de factores atmosféricos y geomorfológicos complejos que siguen siendo materia de estudio. El objetivo de este trabajo es identificar patrones geomorfológicos y de precipitación característicos de cuencas torrenciales en el departamento de Antioquia a partir de bases de datos con reportes históricos, información meteorológica detallada y modelos de elevación digital. Con esta investigación se pretende hacer inferencias generalizadas sobre el fenómeno. Inicialmente se analizan las características geomorfológicas y morfométricas de las cuencas, encontrando que las más importantes son las asociadas al relieve. Se proponen metodologías para identificar cuencas torrenciales obteniendo un porcentaje de error cercano al 15%, el cual disminuye a menos de 10% cuando se introducen indicadores relacionados con la lluvia. El análisis espacial agregado de la precipitación antecedente a los eventos torrenciales muestra que los 10 días anteriores son los más importantes. Además, el comportamiento espacial distribuido de la precipitación durante los eventos torrenciales, evidencia que la lluvia se concentra en las partes altas de las cuencas, donde la interacción con las condiciones geomorfológicas propicia el desencadenamiento del evento torrencial. Los resultados de este trabajo son significativos para la gestión del riesgo del territorio y aportan información relevante sobre el comportamiento geomorfológico y de la precipitación en cuencas torrenciales del departamento.

Palabras clave: avenidas torrenciales, geomorfología, morfometría, lluvia, amenazas naturales, gestión del riesgo

Abstract

Analysis of the geomorphological and rainfall conditions triggering flash floods in basins of the department of Antioquia

Flash floods are one of the main natural threats worldwide. These events are generated by a combination of complex atmospheric and geomorphological factors that are still being studied. The objective of this work is to identify characteristic geomorphological and rainfall patterns of torrential basins in Antioquia, Colombia from databases with historical reports, detailed meteorological information, and digital elevation models. This research aims to make generalized inferences about the phenomenon. Initially, the geomorphological and morphometric characteristics of the basins are analyzed, finding that the most important are those associated with relief. Methodologies are proposed to identify torrential basins, obtaining an error percentage close to 15%, which decreases to less than 10% when indicators related to rain are introduced. The aggregate spatial analysis of the rainfall preceding torrential events shows that the previous 10 days are the most important. In addition, the spatial distribution behavior of rainfall during torrential events shows that the rain is concentrated in the upper parts of the basins, where the interaction with geomorphological conditions favors the triggering of the torrential event. The results of this work are significant for the risk management of the territory and provide relevant information on the geomorphological and rainfall behavior in torrential basins of the department of Antioquia.

Keywords: flash floods, geomorphology, morphometry, rainfall, natural hazards, risk management

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1. Selección de cuencas de estudio.....	5
2. Caracterización geomorfológica de cuencas torrenciales en Antioquia.....	14
2.1 Introducción.....	14
2.2 Datos.....	16
2.3 Metodología	19
2.3.1 Análisis exploratorio de características morfométricas, geomorfológicas y de suelos	19
2.3.2 Índice de importancia.....	19
2.3.3 Clasificación de cuencas con comportamiento desconocido.....	21
2.3.4 Validación de métodos de clasificación de cuencas.....	23
2.4 Resultados y discusión.....	23
2.4.1 Análisis exploratorio de características morfométricas, geomorfológicas y de suelos de las cuencas de estudio.....	23
2.4.2 Importancia de variables morfométricas, geomorfológicas y de suelos en cuencas de estudio	37
2.4.3 Clasificación de cuencas con comportamiento desconocido.....	40
2.4.4 Validación de métodos de clasificación de cuencas.....	41
2.5 Conclusiones.....	43
3. El papel de la lluvia en la identificación de cuencas potencialmente torrenciales	45
3.1 Introducción.....	45
3.2 Datos.....	47
3.3 Metodología	49
3.3.1 Análisis agregado de la precipitación en cuencas de estudio	49
3.3.2 Análisis agregado de la precipitación antecedente de eventos torrenciales ...	51
3.3.3 Caracterización y análisis distribuido de la precipitación en cuencas torrenciales.....	51
3.4 Resultados y discusión.....	52
3.4.1 Caracterización y análisis agregado de la precipitación	52
3.4.2 Análisis agregado de la precipitación antecedente de eventos torrenciales ...	58

3.4.3	Análisis espacial distribuido de la precipitación en cuencas torrenciales	64
3.5	Conclusiones	73
4.	Conclusiones y recomendaciones	77
4.1	Conclusiones	77
4.2	Limitaciones, recomendaciones y trabajo futuro	79
Bibliografía		81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Metodología de selección de cuencas hidrográficas de estudio.	7
Figura 1-2: Ubicación general zona de estudio y cuencas seleccionadas.....	8
Figura 1-3: Comparación de características geomorfológicas entre una cuenca trazada aleatoriamente (comportamiento desconocido) y la cuenca de la quebrada El Piñal, corregimiento de Puerto Venus, Nariño, con comportamiento torrencial.....	12
Figura 2-1: Metodología de clasificación de cuencas con comportamiento desconocido.	22
Figura 2-2: FDP y FDA parámetros morfométricos básicos. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.	24
Figura 2-3: FDP y FDA parámetros morfométricos derivados. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.	26
Figura 2-4: FDP y FDA percentiles índices geomorfológicos. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.	29
Figura 2-5: Distribución espacial del índice geomorfológico TWI en dos cuencas analizadas.	32
Figura 2-6: Distribución espacial del índice geomorfológico HAND en dos cuencas analizadas.	33
Figura 2-7: Distribución espacial del índice geomorfológico rDUNE en dos cuencas analizadas.	35
Figura 2-8: FDP y FDA de variables asociadas con el mapa de suelos, departamento de Antioquia. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.....	36
Figura 2-9: Índice de importancia de variables morfométricas, geomorfológicas y de suelos.....	38
Figura 2-10: Clasificación de cuencas con comportamiento desconocido, con base en cada métrica evaluada: (a) diferencia de medianas, (b) diferencia de FDA, (c) Divergencia Jensen-Shannon	40
Figura 2-11: Distribución del error asociado a las métricas de clasificación de cuencas.....	42
Figura 3-1: Zona de estudio y ubicación de radar meteorológico.....	48
Figura 3-2: FDP y FDA indicadores de precipitación. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.....	53
Figura 3-3: Índice de importancia de indicadores de precipitación. Las líneas corresponden a la importancia promedio para el método de divergencia de Jensen	

Shannon de las variables de geomorfología, morfometría y suelos (línea continua) e indicadores de precipitación (línea punteada)	55
Figura 3-4: Distribución del error asociado a las métricas de clasificación de cuencas. Los diagramas de caja sin relleno corresponden a la distribución del error sólo con variables geomorfológicas y los diagramas con relleno corresponden a la distribución del error incluyendo los indicadores de precipitación.	57
Figura 3-5: Distribución de la precipitación acumulada (escala logarítmica) para los 30 días antecedentes a un evento torrencial en las cuencas de estudio. Cada violín representa la distribución de los datos de lluvia en las 63 cuencas analizadas, para cada día antecedente al evento torrencial. La línea horizontal al interior corresponde a la mediana.	59
Figura 3-6: Precipitación acumulada antecedente de 1 a 15 días contra precipitación del día del evento torrencial en las cuencas de estudio. R corresponde al coeficiente de correlación de Pearson.	61
Figura 3-7: Coeficiente de correlación R entre precipitación acumulada antecedente y precipitación del día del evento, para los 30 días antes de la ocurrencia del evento torrencial.	62
Figura 3-8: Condiciones de precipitación del día del evento y precipitación acumulada antecedente en cuatro cuencas analizadas. En (a) y (c) tuvo mayor relevancia la precipitación del día del evento y en (b) y (d), fue más importante la lluvia acumulada antes del evento.....	63
Figura 3-9: Eventos de lluvia presentados en las cuencas durante el tiempo de registro en mm/día. En rojo se marca el evento de lluvia que generó el evento torrencial reportado para cada cuenca.	64
Figura 3-10: Relación entre percentil 95 de características geomorfológicas de las cuencas (Altura en msnm, pendiente en %, HAND en m, rDUNE y TWI) y el percentil 95 de la precipitación el día del evento torrencial.....	67
Figura 3-11: Modelo de elevación digital (DEM) y distribución espacial de la precipitación el día de los eventos torrenciales en dos cuencas de referencia: (a) cuenca de la quebrada La Liboriana, Salgar y (b) cuenca de la quebrada El Piñal, corregimiento de Puerto Venus, Nariño.....	69
Figura 3-12: Función de densidad de probabilidad del porcentaje de la cuenca cubierto por precipitación convectiva el día del evento torrencial.....	71
Figura 3-13: Porcentaje de precipitación convectiva y precipitación total del día del evento torrencial en cuencas con reporte.....	72

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Parámetros morfométricos básicos y derivados e índices geomorfológicos seleccionados.....	16
Tabla 2-2: Atributos seleccionados del mapa de suelos departamento de Antioquia, escala 1:100.000 - IGAC.	18

Introducción

Las avenidas torrenciales son una de las principales amenazas naturales a nivel mundial debido a las pérdidas de vidas humanas e impactos económicos que causan (Gaume et al., 2009; Jonkman, 2005). Estos eventos se caracterizan por un flujo rápido e hiperconcentrado de agua y sedimentos, que puede transportarse a grandes velocidades en cuencas de montaña, generalmente de áreas pequeñas y fuertes pendientes (Caballero, 2011; Guerrero & Aristizábal, 2019).

Los impactos de las avenidas torrenciales son significativos. En las últimas décadas afectaron a más de 1.4 billones de personas en todo el mundo, con una mortalidad cercana a las 100.000 personas (Jonkman, 2005). Las pérdidas monetarias a nivel mundial en el periodo de 1998 a 2010, excedieron los 40 billones de dólares (Jha et al., 2012). En Colombia, se han reportado más de 16.000 desastres relacionados con eventos torrenciales entre 1935 y 2018, los cuales han afectado a más de 6900 personas (entre heridos, muertos y desaparecidos) (Henaó Salgado & Zambrano Nájera, 2022). También se han reportado más de 1'300.000 viviendas afectadas, así como daños en cultivos e infraestructura (Henaó Salgado & Zambrano Nájera, 2022). En el evento La Niña 2010-2011, se afectaron más de 3 millones de personas y los daños fueron estimados en más de 6.5 billones de dólares (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), 2012). Para el caso de Antioquia, según el DAGRAN, entre 1922 y 2022 se han reportado 338 emergencias relacionadas con este tipo de eventos, las cuales se han presentado con mayor frecuencia desde el año 2010 y han dejado a más de 300 personas fallecidas y más de 13.700 familias afectadas (DAGRAN, 2023).

Entre los factores que propician el desencadenamiento de avenidas torrenciales se encuentran la lluvia de corta duración y alta intensidad, concentrada sobre la cuenca o una porción de ésta, las lluvias acumuladas antes del evento torrencial que aumentan la humedad del suelo, la geomorfología y morfometría de la cuenca, las características del

suelo y la disponibilidad de sedimentos en el cauce y las laderas (Borga et al., 2011; Caballero, 2011; Douinot et al., 2016; Guerrero & Aristizábal, 2019; Marchi et al., 2010). Sin embargo, los mecanismos generadores de este tipo de fenómenos son poco entendidos y aún continúan siendo estudiados en el campo de la hidrología y las amenazas naturales (Borga et al., 2011, 2014; Creutin & Borga, 2003; Gaume et al., 2009; Rozalis et al., 2010; Saharia et al., 2021; Yang et al., 2019).

El estudio de avenidas torrenciales generalmente consiste en una evaluación desagregada de los factores que influyen en su generación. Se ha estudiado la lluvia asociada al desencadenamiento de eventos torrenciales, pero también se han hecho análisis a partir de la geología, geomorfología y suelos, así como el desarrollo de modelos hidrológicos que buscan determinar la respuesta de las cuencas ante los eventos extremos (Aristizábal et al., 2016; Aristizábal, Gamboa, et al., 2010; Bezak et al., 2016; Caballero, 2011; Castillo et al., 2003; Coustau et al., 2012; Llasat et al., 2016; Penna et al., 2011; Velásquez et al., 2020b) Si bien el análisis particular de los factores desencadenantes permite avanzar en el entendimiento del problema, el estudio de las interacciones entre éstos, es fundamental para comprender la complejidad del fenómeno.

Uno de los principales retos en el estudio de las avenidas torrenciales es la falta de información hidrometeorológica (Creutin & Borga, 2003; Gaume et al., 2009; Ragetti et al., 2017). Las cuencas más susceptibles a este tipo de fenómeno no están instrumentadas debido a su ubicación o tamaño (Ruiz-Villanueva et al., 2013; Sivapalan et al., 2012), por lo que se carece de sistemas de monitoreo que ayuden a la observación y pronóstico de los eventos.

Esta investigación pretende identificar patrones geomorfológicos y de precipitación característicos de cuencas torrenciales en el departamento de Antioquia a partir de información meteorológica detallada aportada por el radar meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA) y tomando insumos como los modelos de elevación digital y los reportes de eventos torrenciales en el departamento en los últimos 10 años.

Para el desarrollo, se plantea en primer lugar, establecer las características topográficas y geomorfológicas necesarias para la generación de eventos torrenciales y posteriormente,

analizar el comportamiento agregado y distribuido de la lluvia, así como las condiciones de lluvia antecedente en eventos torrenciales sucedidos en Antioquia. Finalmente se determinarán los patrones geomorfológicos y de lluvia característicos que favorecen la generación de eventos torrenciales en el departamento.

La estructura y metodología del documento se describe así:

Un primer capítulo sobre la selección de cuencas de estudio, las cuales se componen de las cuencas donde se han presentado eventos torrenciales según los reportes de las bases de datos consultadas y de otras cuencas trazadas de manera distribuida por el territorio de Antioquia, con el fin de capturar diferentes topografías. Al final, se tienen dos grupos de cuencas: (1) torrencial y (2) con comportamiento desconocido, los cuales se contrastan para definir características particulares de las cuencas torrenciales del departamento.

El segundo capítulo se compone del análisis y caracterización geomorfológica y morfométrica de las cuencas. En este capítulo, se comparan las características del terreno entre ambos grupos de cuencas. Además, se definen los factores controladores más importantes de eventos torrenciales desde el punto de vista geomorfológico y morfométrico y se propone una clasificación de las cuencas con comportamiento desconocido.

En el tercer capítulo se realiza el análisis del comportamiento agregado y distribuido de la precipitación, a partir de información detallada del radar meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Este análisis se realiza desde tres componentes:

- (1) análisis espacial agregado de la lluvia en las cuencas de estudio, en el cual se proponen indicadores de lluvia, se comparan los dos grupos de cuencas, se analiza la importancia de éstos en el desencadenamiento de eventos torrenciales y su aporte en la clasificación de cuencas en conjunto con las variables geomorfológicas y morfométricas.
- (2) análisis espacial agregado de lluvia antecedente al evento torrencial, a nivel de cuenca, en el cual se analiza el comportamiento de la lluvia durante los días anteriores a los eventos torrenciales en las cuencas donde se tiene reporte.
- (3) análisis espacial distribuido de la lluvia durante el día de los eventos torrenciales, en el cual se analiza la distribución espacial de la lluvia en toda la cuenca durante día del

evento torrencial, su relación con la distribución geomorfológica y el tipo de lluvia que se presentó.

Finalmente se presenta un cuarto capítulo con las conclusiones del trabajo y recomendaciones sobre trabajo futuro.

1. Selección de cuencas de estudio

Las cuencas se seleccionaron utilizando los registros históricos de avenidas torrenciales ocurridas en el departamento de Antioquia entre los años 2012 y 2022. Los registros fueron tomados de inventarios de desastres disponibles a nivel nacional, departamental y municipal de fuentes como: el Sistema de Gestión de Información sobre Desastres (DESINVENTAR), el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN) y el Semillero de Investigación GEOHAZARDS adscrito al Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

El proyecto DESINVENTAR y el DAGRAN cuentan con bases de datos actualizadas de desastres de pequeño, mediano y gran impacto para el territorio, a nivel nacional y departamental respectivamente, las cuales se pueden acceder en (<https://db.desinventar.org/> y <https://dagran.antioquia.gov.co/>). El semillero de investigación GEOHAZARDS proporcionó para el desarrollo de este trabajo una base de datos con la recopilación de los eventos torrenciales ocurridos en Antioquia a nivel municipal y veredal asociando una coordenada geográfica con cierto nivel de incertidumbre (alto, medio o bajo).

Las bases de datos consultadas no proporcionan la ubicación exacta del evento, a excepción de GEOHAZARD, que muchas veces tiene incertidumbre alta en la coordenada registrada, dado que el evento desde su reporte carece de esta información. Esto genera incertidumbre en la definición de la cuenca hidrográfica asociada al evento, sin embargo, se realizó un trabajo manual en el cual se asignó una cuenca a cada evento en el que fue posible hacerlo.

En la **Figura 1-1**, se presenta la metodología del trazado de cuencas. Se tiene un primer grupo de cuencas con registro de eventos torrenciales, para las cuales se parte de la información contenida en las bases de datos. Puntualmente, se revisaron los reportes en la categoría de avenida torrencial, flujo torrencial o flujo de escombros. El segundo grupo corresponde a cuencas trazadas aleatoriamente, distribuidas en diferentes sectores de Antioquia, de las cuales se desconoce si son torrenciales o no, y donde además no se pudo determinar si hay reporte de eventos.

La información extraída de las bases de datos corresponde a la fecha y ubicación del evento, ya que ésta constituye el insumo principal para trazar la cuenca. Además, en algunos casos, se pudo verificar el campo de reflectividad del radar meteorológico del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá - SIATA para la fecha de ocurrencia del evento, por lo que, la cuenca fue trazada aproximadamente en el lugar donde se presentó el campo convectivo de precipitación el día del reporte del evento.

Para el trazado de ambos grupos de cuencas se utilizaron los modelos de elevación digital de la misión ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA por sus siglas en inglés), con resolución de 12,5 m x 12,5 m aproximadamente (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>) (JAXA, 2015). A partir de éstos, se obtuvieron los mapas de direcciones de flujo por medio del complemento GRASS de QGIS (r.watershed) el cual usa el algoritmo At (Ehlschlaeger, 1989). Con base en estos dos insumos y utilizando la librería WMF (Watershed Modelling Framework, <https://github.com/nicolas998/WMF>) de Fortran-Python (Velásquez et al., 2023) se crearon los polígonos de las cuencas. Esta librería está diseñada para trabajar con cuencas hidrográficas y ejecución de modelos hidrológicos, además contiene herramientas para visualización de datos, análisis geomorfológicos y de variables hidrológicas.

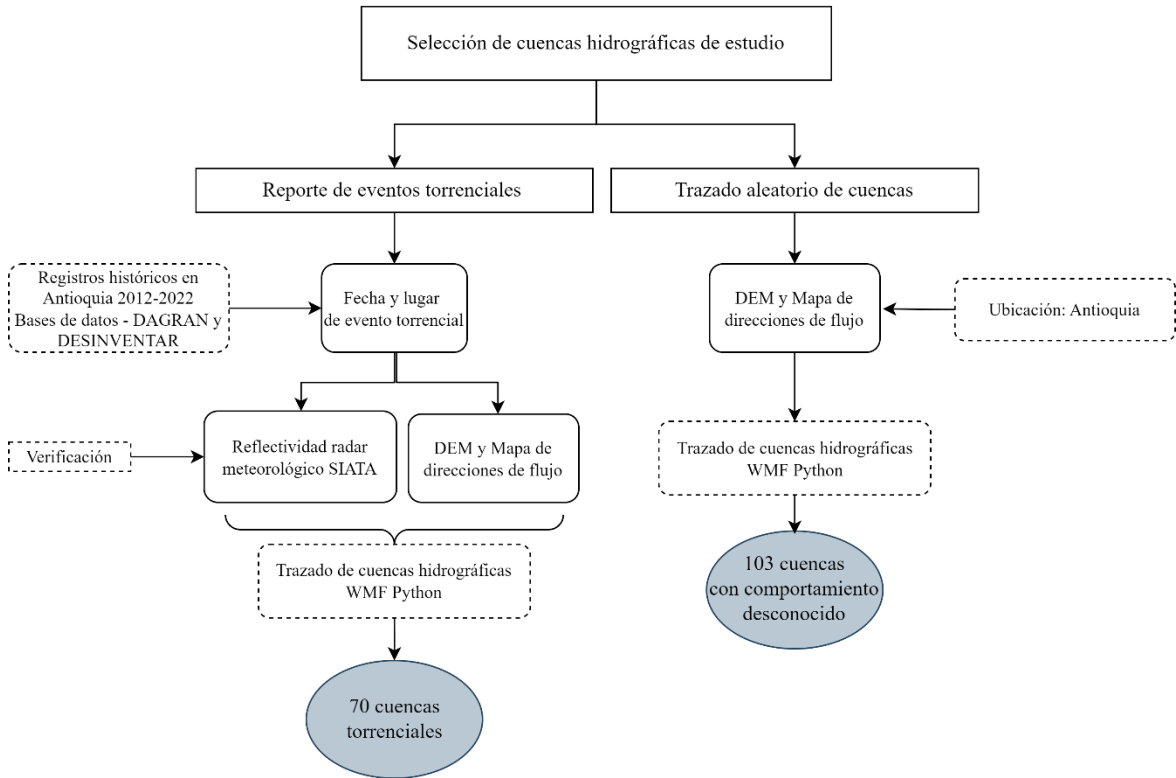


Figura 1-1: Metodología de selección de cuencas hidrográficas de estudio.

Mediante la metodología descrita, se delimitaron 70 cuencas torrenciales y 103 cuencas trazadas aleatoriamente en diferentes regiones de Antioquia, que tienen comportamiento desconocido, utilizadas en la comparación con las cuencas torrenciales. En la **Figura 1-2** se presenta la ubicación geográfica de ambos grupos de cuencas.

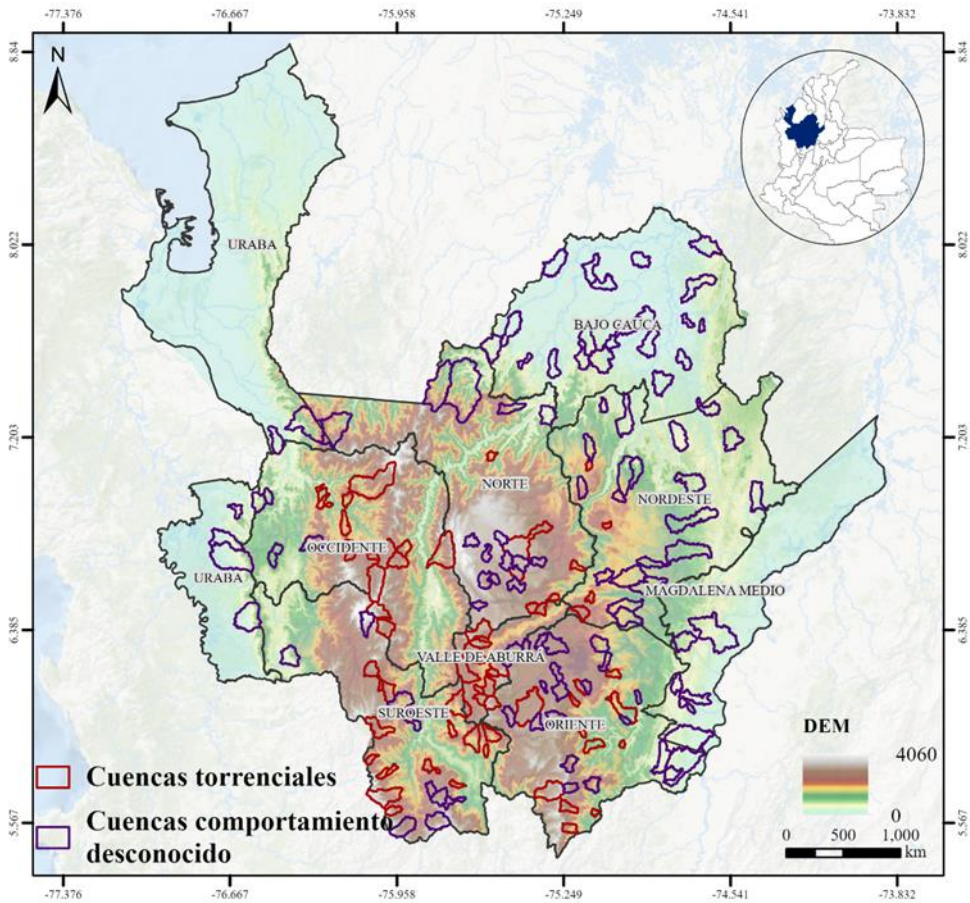


Figura 1-2: Ubicación general zona de estudio y cuencas seleccionadas.

De los eventos seleccionados, el mayor porcentaje de ocurrencia se encuentra en las subregiones del Suroeste y Occidente. En las subregiones del Bajo Cauca, Magdalena Medio y Urabá no se seleccionaron eventos. Si bien en las bases de datos consultadas se tienen algunos registros en estas tres regiones, no se lograron ubicar coordenadas precisas para realizar el proceso de trazado de cuencas.

Las cuencas torrenciales trazadas tienen áreas entre 2.1 km² hasta 200 km². Los eventos torrenciales se presentan en cuencas hidrográficas con áreas pequeñas (menores a 1000 km²), con características topográficas particulares como pendientes escarpadas, con relieve y red de drenaje que favorece la rápida concentración del flujo después de una tormenta (Aronica et al., 2012; Borga et al., 2011, 2014; Caballero, 2011; Creutin et al., 2013).

La particularidad y complejidad del relieve del departamento de Antioquia está dada por la variedad de sus paisajes, los cuales propician el desencadenamiento de eventos torrenciales en ciertas regiones. La topografía del departamento incluye una amplia distribución altitudinal, que va desde el nivel del mar, en el Urabá antioqueño, hasta los casi 4000 msnm en los Farallones del Citará, en la subregión del suroeste antioqueño (Arias, 2011).

La localización de las cuencas torrenciales trazadas responde a la diversidad de relieves que se encuentran en el departamento de Antioquia. Estas cuencas se concentran mayormente en las zonas con alta pendiente, correspondientes al paso de las cordilleras Central y Occidental por el departamento.

Según (Hermelín, 2003) los paisajes del departamento se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **La llanura aluvial del río Magdalena**, ubicado hacia el este del departamento, subregión del Magdalena Medio, donde se tienen principalmente planicies y colinas excavadas en antiguos depósitos del río.
- **La Cordillera Central**, que conforma una porción importante del departamento, ocupando el sureste y parte del centro, en las subregiones de Oriente, Valle de Aburrá y Norte principalmente. Se tienen colinas y vertientes empinadas, pero también altiplanos con topografías más suaves como el oriente antioqueño y Santa Rosa de Osos. El Valle de Aburrá presenta una topografía escarpada y laderas de fuerte pendiente, por lo que es una zona reconocida por presentar eventos torrenciales (Caballero, 2011).
- **El cañón del río Cauca**, ubicado entre la cordillera Central y Occidental y más al norte, el valle aluvial del mismo río, en los límites con el departamento de Córdoba, zona caracterizada por relieves planos, correspondiente a las subregiones del Nordeste y Bajo Cauca.
- **La Cordillera Occidental**, la cual pasa por las subregiones del Suroeste y Occidente, tiene paisajes con vertientes empinadas y alturas hasta los 4000 msnm, donde históricamente se han presentado eventos torrenciales (Hermelín, 2003).
- **El Valle del Atrato y Urabá**, zona conformada por la planicie aluvial del río Atrato y ubicada al occidente del departamento, en la subregión del mismo nombre en límites con Chocó.

El trazado aleatorio de cuencas en diferentes regiones del departamento se hizo con la intención de capturar varios tipos de topografía, aprovechando la diversidad que se tiene. En este caso, se seleccionaron a lo largo del DEM diferentes puntos de cierre de cuencas, las cuales se ubicaron en zonas con relieves más planos como en la región del Magdalena Medio y Bajo Cauca, donde se espera que el comportamiento de las cuencas no sea torrencial por las características del paisaje y otras, en regiones con relieves más escarpados, las cuales podrían llegar a ser torrenciales. Las cuencas trazadas aleatoriamente constituyen una muestra de control para verificar las particularidades geomorfológicas e hidrológicas de las cuencas torrenciales ya conocidas.

Entre las cuencas torrenciales trazadas, se tienen cuencas históricamente reconocidas, en donde se han presentado eventos importantes en los últimos años que han dejado significativas pérdidas humanas y materiales. Tal es el caso de la cuenca de la quebrada La Liboriana en el municipio de Salgar, la cual en el año 2015 presentó una avenida torrencial que dejó al menos 93 personas muertas, 11 desaparecidas, más de 540 damnificadas y más de 300 viviendas afectadas (DESINVENTAR, 2023; Hoyos, Ceballos, Pérez-Carrasquilla, Sepúlveda, et al., 2019; Velásquez et al., 2020a). En esta cuenca también se han reportado otros eventos en 2016 y 2021.

La cuenca de la quebrada La Negra, en la vereda El Piñal, corregimiento Puerto Venus del municipio de Nariño presentó en el año 2018 un evento torrencial, dejando 235 personas afectadas, 50 familias evacuadas y daños materiales en infraestructuras como viviendas, escuelas y puentes (DESINVENTAR, 2023). Otras de las cuencas torrenciales analizadas en este estudio coinciden con las estudiadas por Pérez-Hincapié et al. (2010) correspondientes a las cuencas de los ríos Tapartó y Farallones y de la quebrada La Arboleda, ubicadas al suroeste del departamento que han presentado al menos un evento torrencial desde el año 2012.

El propósito de generar los dos grupos de cuencas es determinar las características geomorfológicas y pluviales de las cuencas torrenciales en comparación con las cuencas trazadas aleatoriamente.

La **Figura 1-3** muestra dos cuencas particulares de cada grupo. Se evidencian diferencias significativas en el relieve y la forma de la red de drenaje. De acuerdo con lo anterior, existen características geomorfológicas particulares que incrementan las probabilidades de torrencialidad (Al-Saif, 2010; Bhatt & Ahmed, 2014; Youssef et al., 2011).

Los índices topográficos y geomorfológicos son de utilidad para describir los patrones espaciales de respuesta de las cuencas ante eventos de lluvia. Un ejemplo de éstos es el HAND (Height Above the Nearest Drainag) (Rennó et al., 2008), que se muestra en la **Figura 1-3** para las cuencas de ambos grupos, donde se evidencia que la cuenca torrencial tiene valores mayores.

Se observa además que el perfil hipsométrico de la cuenca trazada aleatoriamente se comporta como el de una cuenca donde predominan los procesos sedimentarios fluviales, con el mayor porcentaje de área ubicado en las partes bajas de la cuenca. Por su parte, el perfil de la cuenca torrencial exhibe un comportamiento donde pueden tener más relevancia los procesos erosivos, además, gran parte de su área se encuentra en las elevaciones altas y medias.

Con respecto a los parámetros morfométricos evaluados en la **Figura 1-3**, se observan diferencias entre ambas cuencas, donde la cuenca torrencial tiene condiciones de relieve más escarpadas, con una pendiente promedio de 41.2% en contraste con la pendiente de 10.2% de la otra cuenca. Así mismo, la pendiente del cauce principal de ambas cuencas es significativamente diferente. El tiempo de concentración es menor en la cuenca torrencial en comparación con la cuenca trazada aleatoriamente.

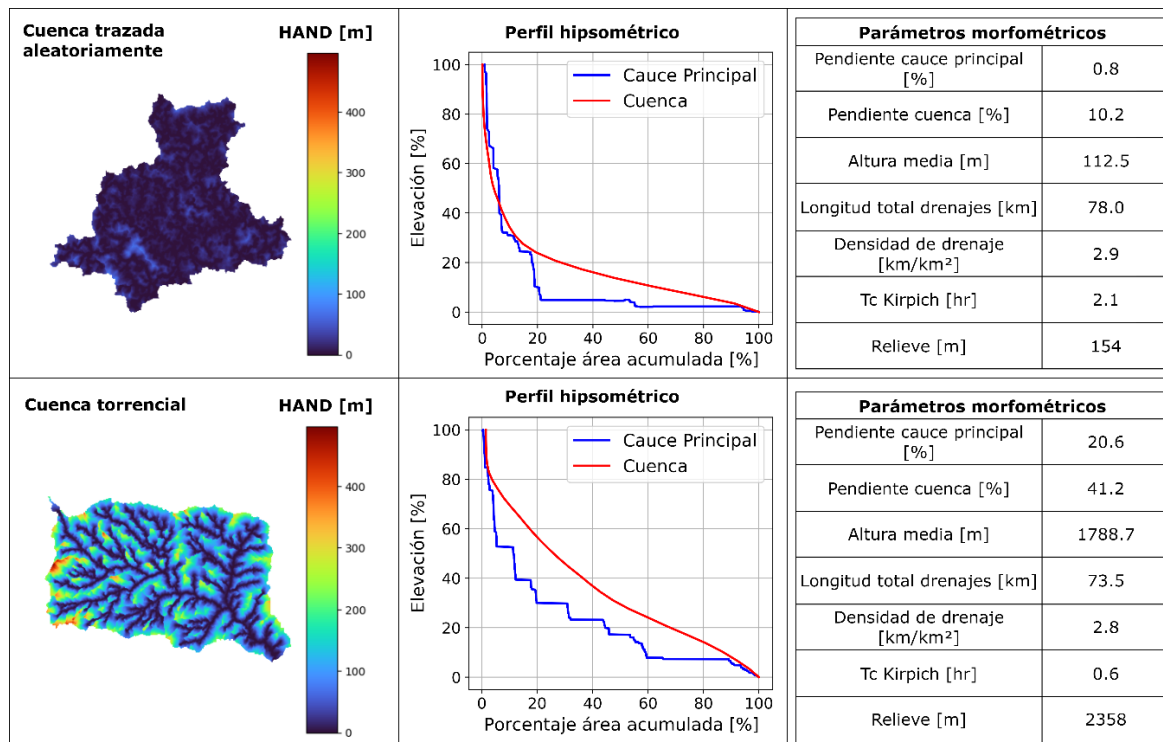


Figura 1-3: Comparación de características geomorfológicas entre una cuenca trazada aleatoriamente (comportamiento desconocido) y la cuenca de la quebrada El Piñal, corregimiento de Puerto Venus, Nariño, con comportamiento torrencial.

Se han desarrollado estudios para priorizar y determinar las variables que más influencia tienen en la respuesta hidrológica torrencial de una cuenca. Por ejemplo, en Alam et al. (2021) y Obeidat et al. (2021), los principales parámetros influenciadores de la torrencialidad fueron relieve, relación de relieve, relación de circularidad, pendiente de la cuenca, densidad de drenaje y número de rugosidad.

De acuerdo con Arango et al. (2021) en la región Andina las propiedades del relieve y del drenaje son las más relevantes en la definición de flujos torrenciales. Parámetros morfométricos como relación de relieve y constante de mantenimiento del canal tienen mayor importancia.

También se han estudiado las avenidas torrenciales desde el punto de vista de la geología, los suelos y la precipitación (Aristizábal et al., 2016; Aristizábal, Martínez, et al., 2010;

Caballero, 2011; Gómez et al., 2023; Guerrero & Aristizábal, 2019; Llasat et al., 2016; Norbiato et al., 2008; Penna et al., 2011). Sin embargo, en muchos casos, se hacen análisis desagregados de los factores generadores. La importancia de analizar los eventos torrenciales desde sus factores detonantes en conjunto es que se pueda mejorar el pronóstico y la gestión del riesgo en el territorio (Rozalis et al., 2010).

2. Caracterización geomorfológica de cuencas torrenciales en Antioquia

2.1 Introducción

Las avenidas torrenciales son una de las amenazas naturales más significativas a nivel mundial por las pérdidas de vidas humanas e impactos económicos que causan (Gaume et al., 2009). Los eventos torrenciales tienen gran impacto a nivel global, ocurren en todos los continentes y durante la última década del siglo XX afectaron a más de 1.4 billones de personas en todo el mundo, con una mortalidad promedio de 1.14% (Jonkman, 2005). Los impactos económicos de un evento torrencial son variables, dependiendo de su magnitud y su localización, sin embargo, en eventos ocurridos en Europa, se han estimado hasta en 1.2 billones de euros (Aronica et al., 2012).

Las avenidas torrenciales resultan de la interacción de características geomorfológicas y morfométricas particulares de las cuencas con eventos meteorológicos extremos, generalmente de origen convectivo y fuertemente localizados, lo cual genera respuestas rápidas del flujo (Douinot et al., 2016; Llasat et al., 2016; Taha et al., 2017).

El análisis geomorfológico de las cuencas hidrográficas se ha realizado para tener un mejor entendimiento de su comportamiento y características hidrológicas, con el fin de comprender la respuesta ante eventos extremos de lluvia y fenómenos como la torrencialidad (Alam et al., 2021; Bhatt & Ahmed, 2014). Por medio de la geomorfología, se pueden hacer clasificaciones de los diferentes tipos de ambientes en una cuenca y determinar el potencial de inundación y otras amenazas hidrológicas, lo cual es útil en la gestión del riesgo (Nobre et al., 2011, 2016). Los insumos más prácticos y accesibles para

hacerlo han sido los modelos de elevación digital, que aportan información topográfica precisa (Rennó et al., 2008).

La geometría de las cuencas, la forma de la red de drenaje y las características del relieve, han sido factores ampliamente estudiados por algunos autores para determinar las condiciones en las que se presentan los eventos torrenciales (Al-Saif, 2010; Bajabaa et al., 2014; Farooq et al., 2019; Patton & Baker, 1976; Youssef et al., 2011). También se han desarrollado índices topográficos y geomorfológicos que han sido usados para describir los patrones espaciales de respuesta de las cuencas, el funcionamiento y la forma del paisaje hidrográfico (Hjerdt et al., 2004; Rodríguez-Iturbe & Valdés, 1979; Sørensen et al., 2006; Tarboton, 1997). El comportamiento hidrológico de una cuenca también depende de las características del suelo y las coberturas vegetales, las cuales tienen un papel fundamental en la transferencia y absorción del agua durante un episodio de lluvia (Castillo et al., 2003; Vannier et al., 2014).

Se han utilizado diferentes técnicas y enfoques analíticos para identificar y priorizar los factores controladores de flujos torrenciales (Arango et al., 2021; El-Fakharany et al., 2021; Obeidat et al., 2021; Qing et al., 2020; Shivhare et al., 2022; Xiong et al., 2020; R. Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2021). Entre las variables más importantes se mencionan la pendiente de la cuenca, densidad de drenaje, número de rugosidad, relieve, relación de relieve, relación de circularidad, constante de mantenimiento del canal, entre otras. Sin embargo, no existe un consenso entre todos los estudios, principalmente, porque cada cuenca y territorio tiene sus propias particularidades.

En este capítulo se realizará el análisis y la priorización de las variables morfométricas, geomorfológicas y del suelo que influyen en la generación de eventos torrenciales en Antioquia, a partir de la comparación entre cuencas con reporte de este tipo de eventos y otras trazadas de forma aleatoria distribuidas por el departamento, que tienen un comportamiento desconocido. Se propondrán metodologías para cuantificar la diferencia de las variables evaluadas entre ambos grupos de cuencas y se definirán los factores controladores de eventos torrenciales más importantes. Al final, se categorizarán las cuencas con comportamiento desconocido en alta, media o baja probabilidad de presentar flujos torrenciales. La idea de esta aproximación es identificar los parámetros de mayor

relevancia y cuantificar la incertidumbre en la determinación de cuencas potencialmente torrenciales.

2.2 Datos

Trabajos realizados por Abdelkader et al. (2021); Alam et al. (2021); Bhatt & Ahmed (2014); Youssef et al. (2011) han estudiado una serie de parámetros básicos de las cuencas que se pueden extraer fácilmente del modelo digital de elevación. Igualmente, se han analizado otros parámetros derivados que en este caso se refieren a los que se calculan mediante la aplicación de fórmulas a partir de los parámetros básicos (Bhatt & Ahmed, 2014).

Chen & Yu (2011) han identificado condiciones favorables para iniciar flujos torrenciales a partir de análisis de índices geomorfológicos como el TWI (Topographic Wetness Index). También se han estudiado otros como el HAND (Nobre et al., 2016; Rennó et al., 2008) y el rDUNE (Kallio et al., 2019; Loritz et al., 2019) para analizar el comportamiento y respuesta hidrológica de una cuenca.

Los parámetros morfométricos básicos, derivados e índices geomorfológicos seleccionados para el desarrollo del presente capítulo se presentan en la **Tabla 2-1**. Su estimación se realizó a partir del modelo de elevación digital, utilizando la librería WMF (Watershed Modelling Framework, <https://github.com/nicolas998/WMF>) de Fortran-Python (Velásquez et al., 2023).

Tabla 2-1: Parámetros morfométricos básicos y derivados e índices geomorfológicos seleccionados.

	Parámetro	Unidad	Fórmula o método	Referencia
Parámetros morfométricos básicos	Área de la cuenca (A)	km ²	Se extrae del DEM	Schumm, 1956
	Pendiente del cauce principal (Sc)	%	Se extrae del DEM	
	Longitud cauce principal (Lc)	km	Se extrae del DEM	Strahler, 1952
	Pendiente de la cuenca (S)	%	Se extrae del DEM	

	Parámetro	Unidad	Fórmula o método	Referencia
	Longitud de la cuenca (Lb)	km	Se extrae del DEM	Schumm, 1956
	Altura máxima cuenca (Hmáx)	m	Se extrae del DEM	
	Altura mínima cuenca (Hmín)	m	Se extrae del DEM	
	Altura media cuenca (Hm)	m	Se extrae del DEM	
	Altura máxima cauce principal (Hmáx _{cauce})	m	Se extrae del DEM	
	Longitud total drenajes (Lu)	km	$Lu = L1 + L2 + \dots + Ln$	Strahler, 1952
	Densidad de drenaje (Dd)	km/km ²	$Dd = Lu/A$	Horton, 1945
	Perímetro (P)	km	Se extrae del DEM	Schumm, 1956
Parámetros morfométricos derivados	Tiempo de concentración ¹ (Tc)	hr	$Tc = 0.0078 \times k \times (Lc/Sc^{0.5})^{0.77}$ k: factor de ajuste de Kirpich	Kirpich, 1940
	Relieve (R)	m	$R = Hmáx - Hmín$	Schumm, 1956
	Relación de relieve (Rr)	(-)	$Rr = R/Lb$	Schumm, 1956
	Número de rugosidad (Rn)	(-)	$Rn = D \times (R/1000)$	Melton, 1957
	Factor de forma (Ff)	(-)	$Ff = A/Lb^2$	Horton, 1932
	Índice de Melton (M)	(-)	$M = R/\sqrt{A}$	Melton, 1957
	Relación de elongación (Re)	(-)	$Re = \left(\frac{2}{Lb}\right) \times \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0.5}$	Schumm, 1956
	Relación de circularidad (Rc)	(-)	$Rc = 4\pi A/P$	Miller, 1953
	Coefficiente de compacidad (Cc)	(-)	$Cc = 0.2841 \times P/A^{0.5}$	Gravelius, 1941
	Constante de mantenimiento del canal (Cmc)	(-)	$Cmc = 1/Dd$	Schumm, 1956
Índices geomorfológicos	Índice topográfico de humedad (TWI)	(-)	$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan(\beta)}\right)$ α es el área contribuyente para cada elemento, $\tan(\beta)$ es la pendiente en radianes para cada elemento	Beven, 1979
	Height Above the Nearest Drainage (HAND)	(m)	Diferencia de altura entre un pixel y el pixel donde drena. Se extrae del DEM	Renno, 2008

¹ Se tomó el tiempo de concentración basado en la fórmula de Kirpich (Kirpich, 1940).

	Parámetro	Unidad	Fórmula o método	Referencia
	Reduced dissipation per unit length index (rDUNE)	(-)	$rDUNE = -\ln \left(\frac{HAND}{HDND} \right)$ HDND es la longitud de flujo al drenaje más cercano.	Loritz, 2019

Fuente: Alam et al. (2021); Ghasemlounia & Utlu, (2021); Loritz et al. (2019).

Las características de los suelos se tomaron a partir del mapa de suelos del departamento de Antioquia a escala 1:100.000 de acceso libre en formato shape, proporcionado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC (<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>). En la **Tabla 2-2** se muestran los atributos del archivo shape utilizados para definir las variables relacionadas con el suelo para el desarrollo de este capítulo.

Se resalta que la mayoría de los atributos del archivo shape están descritos de forma cualitativa, por lo que se requirió hacer algunas estimaciones con base en esa información para obtener datos cuantitativos de las variables del suelo. Además, dentro de las falencias que tiene la información es que no cuenta con metadatos, por lo que no se tiene una definición concreta de todos los atributos y sus categorías.

Tabla 2-2: Atributos seleccionados del mapa de suelos departamento de Antioquia, escala 1:100.000 - IGAC.

Atributo shapefile	Descripción o categorías	Observación
Paisaje	Altiplanicie Cuerpo de agua Lomerío Misceláneo rocoso Montaña Piedemonte Planicie fluvio-lacustre y planicie aluvial Planicie marina y fluviomarina Valle aluvial Zona Urbana	Se definió el porcentaje (%) de área de cada cuenca en la categoría de paisaje "Montaña".
Características	Se definen de forma cualitativa propiedades de los suelos como profundidad, drenaje, textura, fertilidad, etc.	No es posible clasificar cuantitativamente las propiedades del suelo. Se realizan estimaciones del porcentaje de arena y arcilla del suelo (textura), con base en las definiciones de textura proporcionadas por el Departamento de Agricultura de los

Atributo shapefile	Descripción o categorías	Observación
		Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés).

Como se menciona en la **Tabla 2-2**, a partir del atributo “características” se estimó el porcentaje de arena y arcilla de cada cuenca de estudio. A partir de estos porcentajes, mediante el software Soil-Plant-Air-Water (SPAW) (Saxton, K. E., Rawls, 2006) desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), se estimó la conductividad hidráulica saturada en mm/h y la densidad del suelo en gr/cm³. En total, se definieron las siguientes cinco variables para el análisis de las características del suelo en las cuencas de estudio: (1) porcentaje de área en paisaje de montaña [%], (2) porcentaje de arcilla [%], (3) porcentaje de arena [%], (4) conductividad hidráulica saturada [mm/h], (5) densidad del suelo [gr/cm³].

2.3 Metodología

2.3.1 Análisis exploratorio de características morfométricas, geomorfológicas y de suelos

Se realizó una evaluación inicial exploratoria basada en la comparación de los dos grupos de cuencas. Se utilizaron las funciones de densidad de probabilidad (FDP) y funciones de densidad acumulada (FDA) de las variables evaluadas, para visualizar las diferencias entre los parámetros de ambos grupos de cuencas.

2.3.2 Índice de importancia

Se cuantificó la diferencia para cada variable entre ambos grupos de cuencas por medio de tres métricas:

1. Métrica diferencia de medianas

Para cada variable geomorfológica analizada se definió la mediana del grupo de cuencas torrenciales y la mediana del grupo de cuencas aleatorias. La métrica se definió por medio del valor absoluto de la diferencia entre ambos valores (Ecuación 2.1):

$$Diferencia\ variable_x = |Mediana\ grupo\ torrencial - Mediana\ grupo\ aleatorias|$$

Ecuación 2.1

2. Métrica diferencia de FDA

Para cada variable geomorfológica analizada se definió el promedio del Δh , el cual corresponde a la diferencia entre cada valor de la función de densidad acumulada (FDA) de las cuencas torrenciales y aleatorias (Ecuación 2.2)

$$Diferencia\ variable_x = Promedio(|\Delta h|)$$

Ecuación 2.2

3. Métrica Divergencia de Jensen Shannon (JSD)

La divergencia de Jensen Shannon es una medida estadística usada para comparar dos distribuciones de probabilidad. Está basada en Kullback-Leibler Divergence (KLD). La JSD toma el promedio de la KLD entre dos distribuciones y su inverso, representando una versión simétrica de la KLD (Ecuación 2.3)

$$Diferencia\ variable_x = Divergencia\ Jensen\ Shannon\ (J.\ Lin,\ 1991)$$

Ecuación 2.3

Cada métrica (Ecuación 2.1, Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3) se convirtió en un índice llamado "importancia", el cual se halla conforme a la Ecuación 2.4. Los valores más altos representan mayor diferencia entre los dos grupos de cuencas de estudio, por lo tanto, esas variables se consideran más relevantes a la hora de definir comportamiento torrencial.

$$Importancia = \frac{Diferencia\ variable_x}{\sum Diferencias}$$

Ecuación 2.4

La \sum *Diferencias* corresponde a la suma de las diferencias de las variables para cada métrica. Finalmente, la sumatoria de las importancias de cada métrica debe ser igual a 1.

Para cada métrica se determinó un rango o distribución de importancia de cada variable evaluada en el análisis. Para esto, se halló la importancia de cada variable 500 veces, cada vez, tomando una muestra aleatoria del 70% de cuencas torrenciales.

2.3.3 Clasificación de cuencas con comportamiento desconocido

Dado que se buscaba clasificar las cuencas con comportamiento desconocido en baja, media o alta propensión a la torrencialidad, se tomó cada cuenca y se compararon los valores de sus variables con los percentiles 5 y 95 de las variables de cuencas torrenciales, como se muestra en la **Figura 2-1**, de modo que:

En el caso de una relación directa de la variable con la torrencialidad:

Si el valor de la variable en la cuenca con comportamiento desconocido es menor al percentil 5 de la cuenca torrencial, la primera tiende a la no torrencialidad en la variable evaluada.

En el caso de una relación inversa de la variable con la torrencialidad:

Si el valor de la variable en la cuenca con comportamiento desconocido es mayor al percentil 95 de la cuenca torrencial, la primera tiende a la no torrencialidad en la variable evaluada.

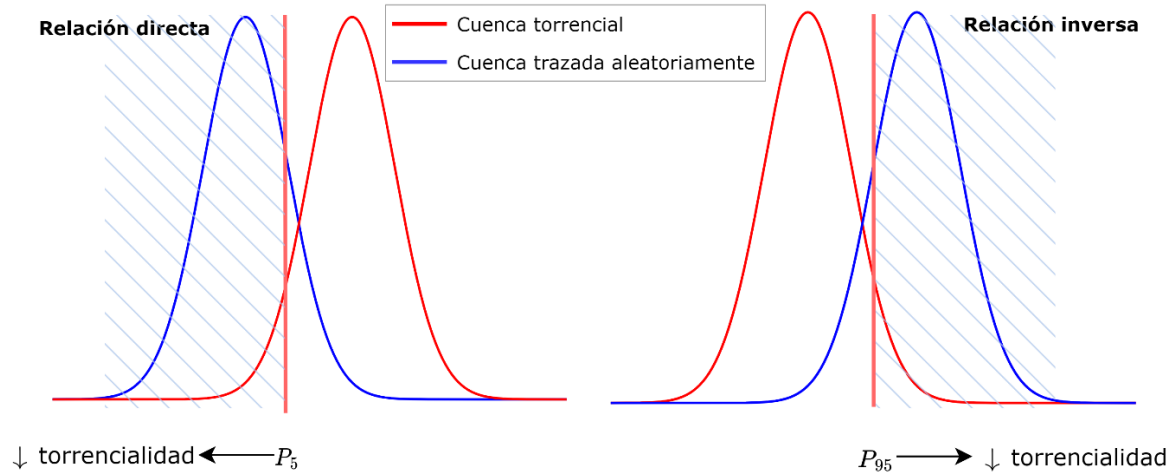


Figura 2-1: Metodología de clasificación de cuencas con comportamiento desconocido.

Con la evaluación anterior, cierta cantidad de variables indicarían una tendencia a la no torrencialidad y otras a la torrencialidad. Por lo que, tomando la importancia hallada anteriormente como un factor ponderador de cada variable, se realizó el cálculo de la probabilidad de que la cuenca particular tuviera comportamiento tendiente a la torrencialidad, así:

$$P = \frac{\sum \text{variables tendientes a la torrencialidad}}{n}$$

Ecuación 2.5

Donde n es la cantidad de variables evaluadas.

Con lo anterior, se definieron los siguientes rangos de probabilidad a la torrencialidad, que significan en este caso, que una cuenca particular puede ser propensa a la torrencialidad en alta, media o baja proporción, en comparación con las cuencas torrenciales conocidas.

En este caso, las categorías de clasificación parten de la similitud que puede tener una cuenca con comportamiento desconocido con respecto a una que sea torrencial, por lo tanto, en las cuencas con alta probabilidad ($0.8 \leq P \leq 1.0$) más del 80% de las variables geomorfológicas evaluadas tienden a la torrencialidad. Por el contrario, las cuencas con

baja probabilidad son cuencas que tienen entre 0 y 40% de variables tendientes a la torrencialidad, por lo que se asume que se comportan diferente a una cuenca torrencial.

$$0.0 \leq P < 0.4 \rightarrow \text{Baja probabilidad}$$

$$0.4 \leq P < 0.8 \rightarrow \text{Media probabilidad}$$

$$0.8 \leq P \leq 1.0 \rightarrow \text{Alta probabilidad}$$

2.3.4 Validación de métodos de clasificación de cuencas

La validación del método se realizó para el grupo de cuencas torrenciales (70 cuencas en total), las cuales, de acuerdo con la metodología empleada, deben tener un comportamiento con alta propensión a la torrencialidad, ubicándose en el rango de 0.8 a 1.0.

Se seleccionaron muestras de 70%, 50% y 30% de estas cuencas para el entrenamiento y sus porcentajes complementarios para la validación. Se definió la distribución del error con base en 1000 iteraciones realizadas para cada muestra. El porcentaje de error se define como las veces que las cuencas de validación fueron clasificadas en media o baja propensión a la torrencialidad, dado que son cuencas torrenciales conocidas.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Análisis exploratorio de características morfométricas, geomorfológicas y de suelos de las cuencas de estudio

Los resultados de esta sección fueron clasificados en cuatro grupos, de acuerdo con los conjuntos de variables analizadas: parámetros morfométricos básicos, parámetros morfométricos derivados, índices geomorfológicos y variables asociadas al mapa de suelos del departamento de Antioquia. Se compararon las funciones de densidad de

probabilidad (FDP) y funciones de densidad acumulada (FDA) de todas las variables para ambos grupos de cuencas estudiados.

- **Parámetros morfométricos básicos**

La **Figura 2-2** muestra las funciones de densidad de probabilidad y de densidad acumulada de los parámetros básicos analizados en este capítulo.

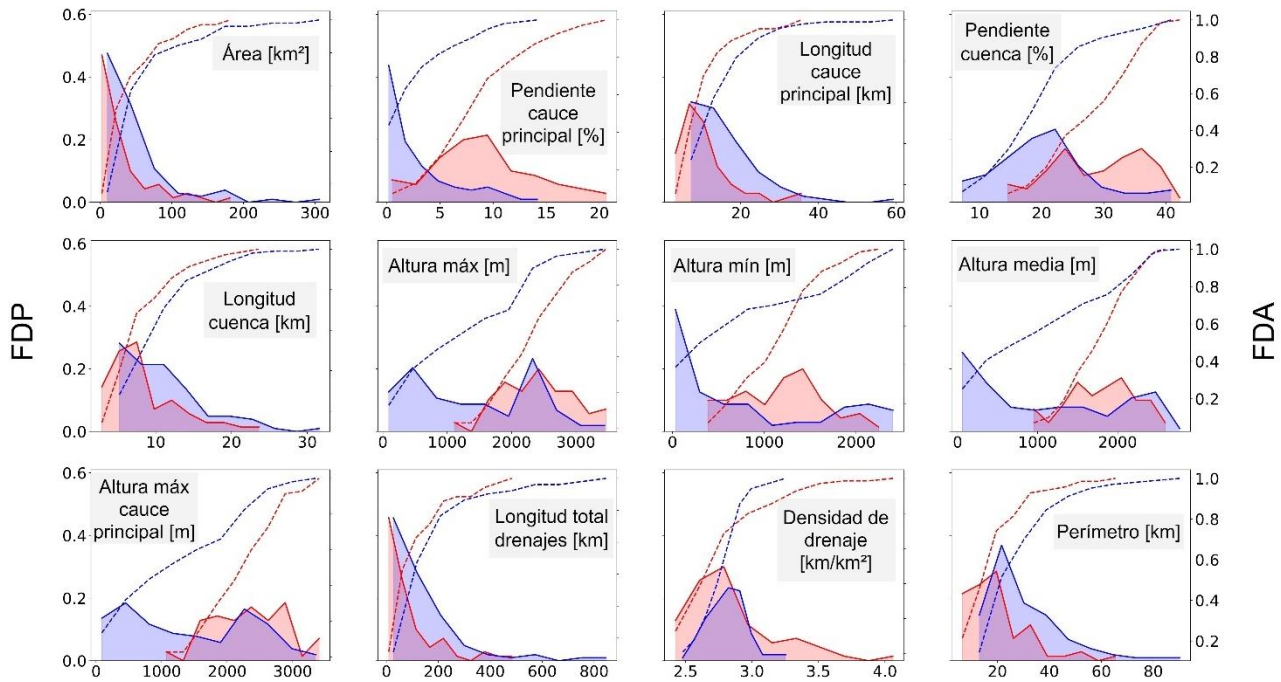


Figura 2-2: FDP y FDA parámetros morfométricos básicos. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.

La pendiente promedio del cauce es uno de los parámetros más diferenciadores entre ambos grupos de cuencas. Se evidenció que la mayoría de las cuencas torrenciales tuvieron pendientes del cauce entre 5% y 20%, mientras que las cuencas trazadas aleatoriamente se concentraron en pendientes menores a 5%. De acuerdo con Welsh & Davies (2011), los flujos torrenciales se dan en cuencas con una pendiente del canal mayor a 5%, en coherencia con los resultados obtenidos en este estudio.

La pendiente de la cuenca para el grupo de cuencas torrenciales mostró un comportamiento bimodal en su FDP, con un pico entre 20% y 25% y otro alrededor de 35%. El valor medio para este grupo fue de 30.7% mientras que el grupo de cuencas aleatorias se concentró en pendientes menores al 25%, con un valor promedio de 22.4%. La pendiente de la cuenca es un parámetro morfométrico importante ya que determina la relación escorrentía vs infiltración, pues a mayor pendiente, mayor capacidad de escorrentía, por lo que se intensifican los procesos de flujos rápidos en las cuencas. Las cuencas menos propensas a la torrencialidad tienen pendientes menores, en coherencia con el estudio de Mahala (2020), donde una cuenca aluvial mostró pendientes menores a 17%.

Algunos parámetros básicos como altura máxima, media y mínima de la cuenca y altura máxima del cauce principal mostraron un comportamiento bimodal para el grupo de las cuencas aleatorias, con lo que se podría intuir que dentro de este grupo se tuvieron cuencas tendientes a la torrencialidad y otras que definitivamente se alejaron de éste. En general, estos cuatro parámetros mostraron una clara diferenciación para los grupos de cuencas analizados.

Parámetros básicos como longitud del cauce principal, longitud de la cuenca, longitud total de drenajes y perímetro, parecen ser parámetros poco diferenciadores entre ambos grupos de cuencas analizados, debido a que sus FDP se sobreponen y la diferencia promedio entre sus funciones de densidad acumulada es pequeña. En este sentido, Ilinca (2021) en su estudio menciona que cuencas con inundaciones lentas tienen longitudes mayores, del orden de 5.7 a 19.3 km. Por otro lado, longitudes de cuenca menores a 2.7 km están asociadas con flujos torrenciales de acuerdo con Welsh & Davies (2011).

Por su parte, el histograma del parámetro densidad de drenaje para cuencas aleatorias estuvo totalmente inmerso en el del grupo de cuencas torrenciales. El valor medio del grupo de cuencas torrenciales fue 2.9 km/km², mientras que el del grupo de cuencas trazadas aleatoriamente fue de 2.8 km/km². Si bien un mayor valor de densidad de drenaje indica mayor capacidad de escorrentía y por lo tanto mayor potencial de flujo (Farhan et al., 2017), en este caso no se evidenciaron diferencias entre los valores de densidad de drenaje, por lo que no es una variable concluyente en el presente análisis. Sin embargo, este resultado se puede deber a que la red de drenaje en una cuenca es función de los

suelos, la geología y la topografía y en este caso, la red de drenaje se definió a partir del área acumulada, lo que constituye una limitación para el presente análisis.

▪ Parámetros morfométricos derivados

Con respecto a los parámetros morfométricos derivados, se observa en la **Figura 2-3** que las diferencias más significativas entre ambos grupos de cuencas se encontraron en las variables: relieve, relación de relieve, número de rugosidad e índice de Melton.

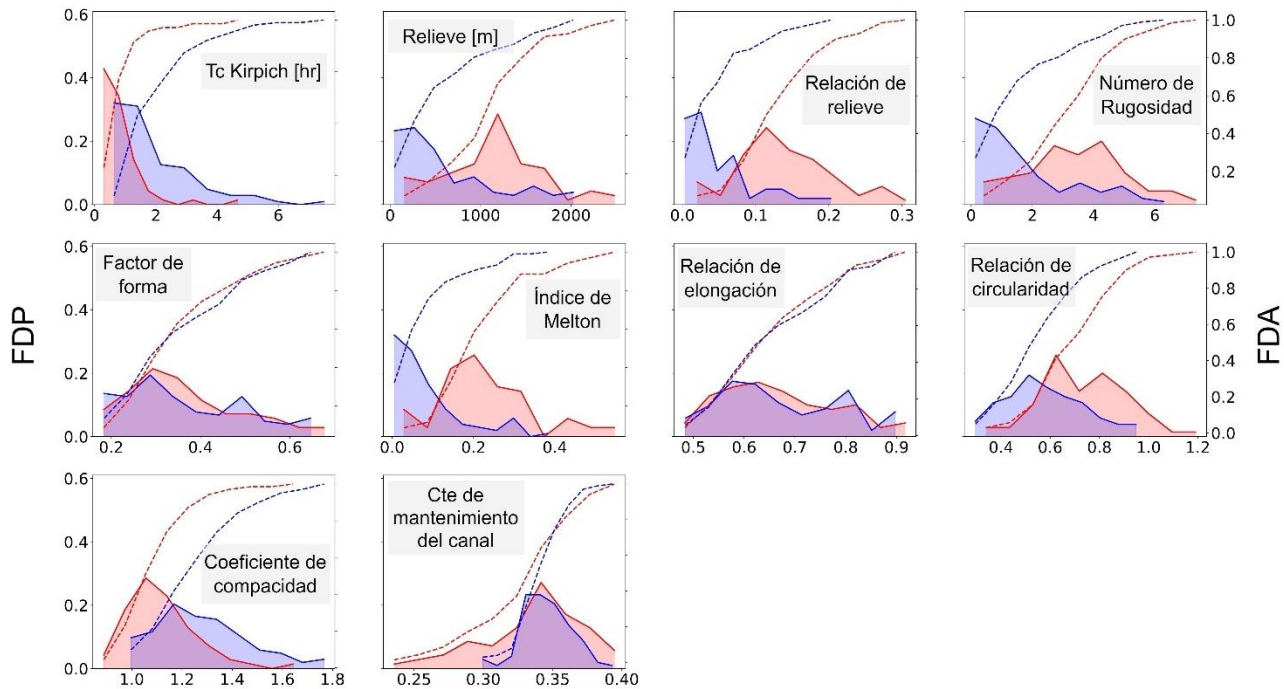


Figura 2-3: FDP y FDA parámetros morfométricos derivados. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.

En el caso del tiempo de concentración, al tener una relación inversa con la torrencialidad, los valores más bajos de este parámetro implican menor probabilidad a eventos súbitos de flujos en las cuencas (Alam et al., 2021). Los resultados obtenidos agruparon las cuencas torrenciales en valores menores a 2 horas, coherente con lo presentado por Alam et al. (2021), donde cuencas con mayor susceptibilidad a eventos torrenciales tuvieron tiempos de concentración entre 30 y 60 minutos. Por su parte, el grupo de cuencas aleatorias presentó tiempos de concentración de hasta 7 horas.

El relieve, correspondiente a la diferencia de alturas de la cuenca, exhibió un pico importante alrededor de los 1000 a 1500 m para cuencas torrenciales, igual que la relación de relieve, con valores entre 0.10 a 0.15 m. Estos parámetros se han considerado importantes por autores como Ghasemlounia & Utlu (2021), ya que valores más altos de éstos indican alto flujo superficial, cortos tiempos de concentración, corrientes máximas altas y alta capacidad de erosión, por lo que valores mayores corresponden a alto potencial de flujo (Mahala, 2020), desencadenando posibles eventos torrenciales en las cuencas.

El índice de Melton también se consideró como un parámetro morfométrico diferenciador en las cuencas analizadas, debido al comportamiento que mostraron las funciones de densidad de probabilidad (FDP) de ambos grupos. De acuerdo con Ilinca (2021), los valores más altos de índice de Melton están asociados a flujos torrenciales, mientras los más bajos se presentan en cuencas fluviales con procesos de inundación más lenta. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos, donde las cuencas con reporte de eventos torrenciales tuvieron valores de índice de Melton mayores (media = 0.3) y las cuencas aleatorias valores más bajos, con una media de 0.1. De acuerdo con Marchi & Tecca (1995), los flujos torrenciales ocurren en cuencas con índice de Melton mayores a 0.25-0.30, mientras que las cuencas con abanicos fluviales de pendientes menos escarpadas suelen tener valores de índice de Melton menores a 0.25. Así mismo, Welsh & Davies (2011) mencionan que valores de índice de Melton mayores a 0.30 están asociados a cuencas propensas a tener flujos rápidos y torrenciales.

El número de rugosidad es uno de los indicadores más importantes de potencial torrencial en una cuenca (Ghasemlounia & Utlu, 2021). Tiene una relación directa con la generación de flujos torrenciales, puesto que a medida que aumenta el número de rugosidad, aumentan los picos de flujo en la cuenca. Las cuencas con valores más altos de número de rugosidad tienen mayor probabilidad de presentar flujos torrenciales, como es el caso de las cuencas con reporte de eventos, que tuvieron valores hasta 7, mientras que las cuencas aleatorias presentaron sus valores entre 0 y 2. De acuerdo con Adnan et al. (2019), números de rugosidad mayores a dos se consideran valores extremos, indicando topografías complejas donde se favorecen los flujos rápidos y súbitos (Alam et al., 2021).

Parámetros relacionados con la forma o geometría de la cuenca como relación de elongación, relación de circularidad y factor de forma no exhibieron diferencias

significativas entre los grupos de cuencas estudiadas. Estos índices se refieren a qué tanto se acerca la forma de la cuenca a una forma circular, dado que ésta se asocia generalmente con caudales altos en cortos periodos de tiempo. En el caso de la relación de circularidad, también es un indicativo de qué tan joven o madura puede estar una cuenca (Mahala, 2020).

Las cuencas de montaña tienden a tener formas circulares. En este estudio, se obtuvo un factor de forma promedio de 0.4 tanto para cuencas torrenciales como para cuencas aleatorias. Si bien este valor indica cuencas cercanas a una forma circular, no se logra una diferenciación de valores medios en ambos grupos. Así mismo sucede con la relación de elongación, que presentó un valor promedio de 0.7 para ambos grupos, coincidiendo con cuencas circulares.

Por su parte la relación de circularidad para cuencas torrenciales tuvo una media de 0.8, mientras que las cuencas aleatorias de 0.6. Lo anterior coincide con Mahala (2020), donde una cuenca de montaña obtuvo mayor valor de relación de circularidad que una cuenca de llanura.

Finalmente, la FDP del parámetro constante de mantenimiento del canal en cuencas trazadas aleatoriamente se asemejó a la FDP del grupo de cuencas torrenciales, por lo que no se consideró como un parámetro relevante para diferenciar torrencialidad. El valor promedio en ambos grupos fue de 0.4 asociado con cuencas jóvenes (Mahala, 2020).

Así como en los parámetros básicos, en este grupo se evidenció que algunas de las cuencas aleatorias tuvieron comportamiento similar a las cuencas torrenciales, es decir, en los mismos rangos de valores. Otras cuencas trazadas aleatoriamente mostraron comportamientos alejados del grupo de cuencas torrenciales, indicando una tendencia mayor a la no torrencialidad.

▪ **Índices geomorfológicos**

Los índices geomorfológicos han sido usados para describir la respuesta de las cuencas ante eventos extremos de precipitación y el funcionamiento y forma del paisaje hidrográfico

(Sørensen et al., 2006). En el presente estudio han sido útiles para evaluar las características topográficas de las cuencas analizadas.

Debido a que los índices evaluados tienen un valor en cada pixel de una cuenca, se hizo un análisis por percentiles para tener un valor específico en cada cuenca. En la **Figura 2-4** se muestran las funciones de densidad de probabilidad de percentiles 25, 50, 75 y 90 de los índices geomorfológicos analizados.

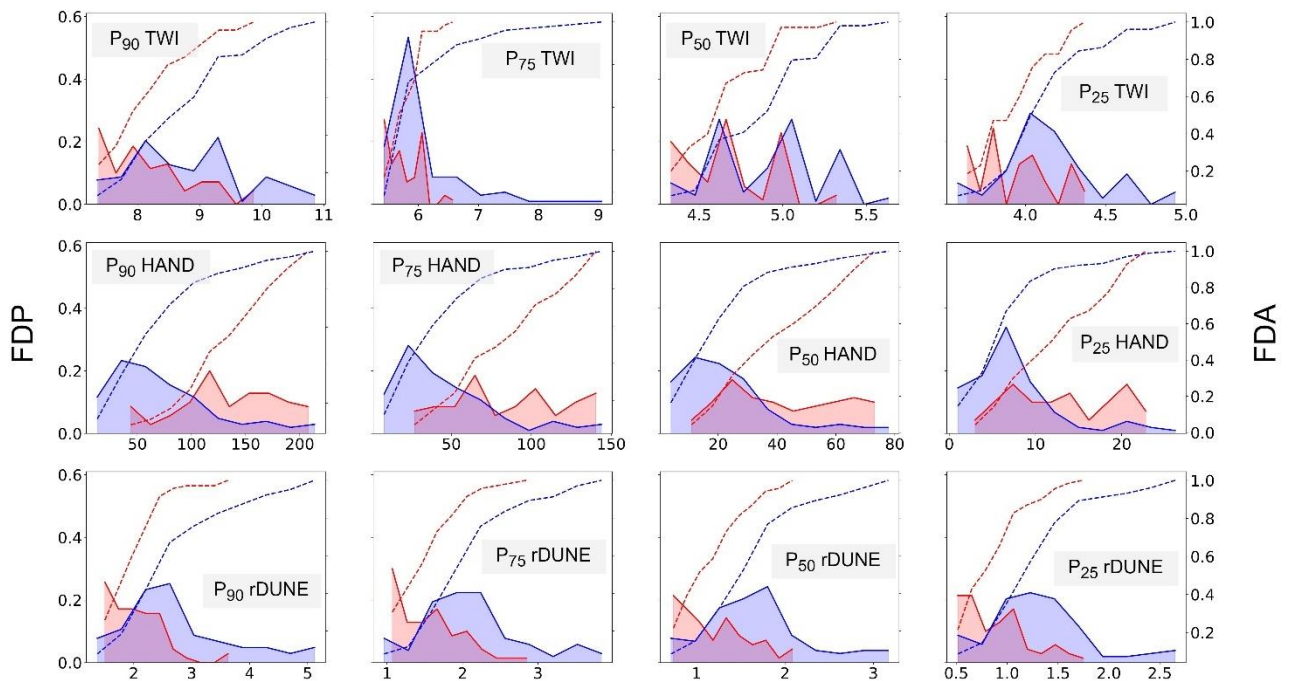


Figura 2-4. FDP y FDA percentiles índices geomorfológicos. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.

El índice topográfico de humedad (TWI) ha sido comúnmente usado para predecir la respuesta hidrológica en cuencas no instrumentadas (Beven & Kirkby, 1979). Su aplicación se basa en combinar el área contribuyente por unidad de longitud de contorno y la pendiente de cada elemento de una cuenca hidrográfica con el fin de cuantificar los controles topográficos en procesos hidrológicos (Sørensen et al., 2006).

Este índice describe el efecto de la topografía en la localización y el tamaño de zonas saturadas por agua. Valores de TWI altos se dan en zonas con pendientes muy suaves y depresiones superficiales en el terreno, donde el agua lluvia se queda detenida, se

disminuye la escorrentía superficial y se inician procesos de infiltración que afectan negativamente al suelo, saturándolo y provocando mayor susceptibilidad a deslizamientos superficiales (Nefeslioglu et al., 2008).

Los valores más altos de TWI corresponden a áreas con menor drenaje y en consecuencia, una mayor probabilidad de acumulación de escorrentía y procesos de inundaciones lentas (J. M. Lin & Billa, 2021).

El análisis de los percentiles 25, 50, 75 y 90 del TWI en los dos grupos de cuencas de estudio, dejó ver un comportamiento inverso del índice con la torrencialidad, es decir, las cuencas torrenciales mostraron valores más pequeños. Por ejemplo, el valor medio del percentil 75 del TWI para cuencas torrenciales fue de 5.8 y para cuencas aleatorias de 6.3.

Lo anterior en congruencia con el estudio de Nefeslioglu et al. (2008), donde valores más altos de TWI corresponden a zonas saturadas de agua, en las cuales disminuye la escorrentía superficial, por lo tanto, sería menos probable tener un evento de flujo rápido o torrencial. En dicho estudio, las celdas donde se han presentado deslizamientos superficiales por saturación de agua obtuvieron un TWI mayor a las celdas donde no se han presentado (6.3 y 6.0 respectivamente).

Así mismo, de acuerdo con el estudio de Costache et al. (2020), el rango de valores de TWI en el que comúnmente se encuentran la mayoría de los píxeles de cuencas torrenciales van de 4.6 a 12.0, mientras que el rango de 15.0 a 25.0, tiene poco porcentaje de píxeles torrenciales.

En el caso de las cuencas de análisis, el hecho de haber agregado todas las celdas de cada cuenca en un valor único, que en este caso está representado por los percentiles, pudo ocasionar que se perdiera detalle en zonas particulares que pueden ser más susceptibles a presentar deslizamientos por la saturación del suelo, sin embargo, este análisis deja ver la utilidad general del índice para diferenciar cuencas donde se tiene mayor susceptibilidad a presentar crecientes súbitas, de otras que puedan tener mayor tendencia a inundaciones lentas o movimientos en masa.

Adicionalmente, a la hora de analizar este índice geomorfológico, es importante contar con insumos topográficos con la mayor resolución espacial posible, ya que según C. Y. Chen & Yu (2011), los valores del TWI pueden disminuir drásticamente dependiendo de la resolución del DEM. En ese caso, con una resolución de 10 m, se obtuvo un valor medio de TWI de 5.2 en una cuenca de estudio, mientras que, con una resolución de 40 m, se obtuvo un valor de 8.1 para la misma cuenca. En el estudio de Wu et al. (2008), se compararon seis resoluciones diferentes de DEM (4, 6, 8, 10, 20 y 30 m) y se obtuvieron mayores valores de la mediana del índice topográfico de humedad en cada una de ellas. Esto se debe principalmente a que a medida que se aumenta la resolución se tiende a suavizar la topografía (Wu et al., 2008).

Con respecto a la distribución espacial del índice, los pixeles de las cuencas donde se tuvieron mayores valores de TWI corresponden a las zonas más bajas, siguiendo la línea de los cauces, como se observa en la **Figura 2-5** que muestra de manera espacial la distribución de valores del índice en dos cuencas analizadas, una torrencial y otra aleatoria con comportamiento desconocido. En general, se observaron mayor cantidad de pixeles con valores menores de TWI en la cuenca torrencial, dejando ver que se tienen menos zonas inundables y que éstas se encuentran asociadas a los pixeles cercanos a los cauces.

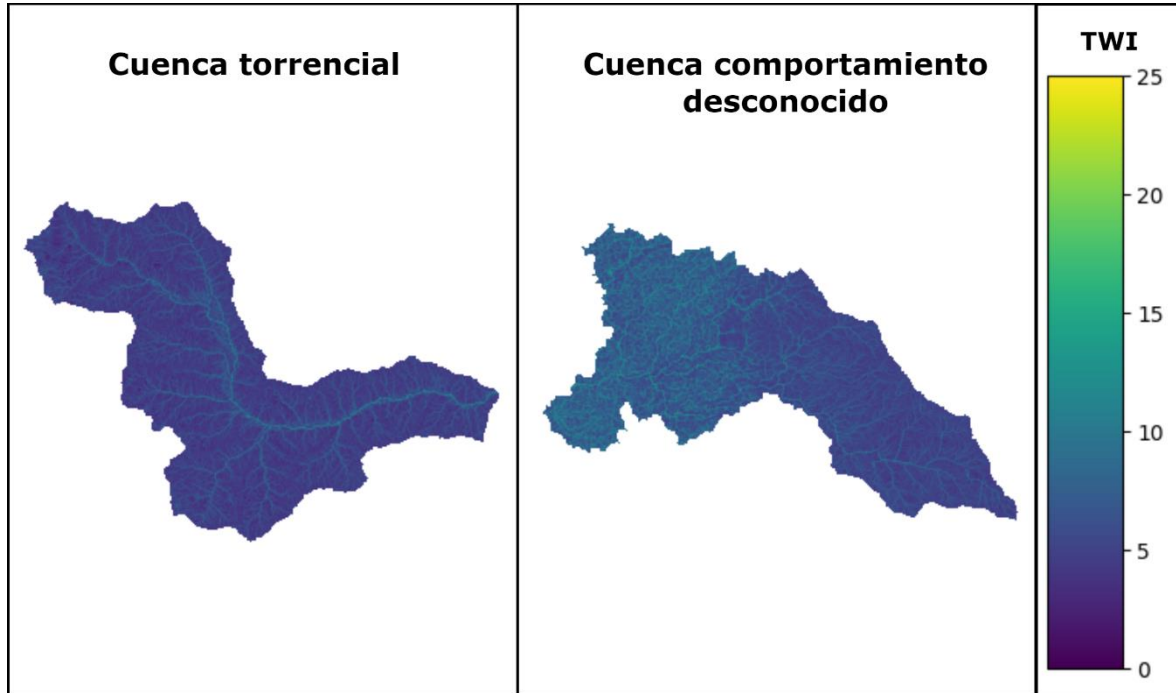


Figura 2-5: Distribución espacial del índice geomorfológico TWI en dos cuencas analizadas.

El índice HAND (Height Above Nearest Drainage) se define como la distancia vertical (altura) desde una celda i de la ladera hasta la celda j más cercana donde drena, es decir, la diferencia de nivel entre dichas celdas que pertenecen a una misma ruta de flujo (Nobre et al., 2011; Rennó et al., 2008). De acuerdo con Loritz et al. (2019), la diferencia de altura, relacionada con la energía geopotencial, es uno de los principales controles para la generación de flujo en las laderas.

Según el análisis realizado, el HAND de ambos grupos de cuencas para todos los percentiles evaluados, mostró diferencias significativas. Se observó que las cuencas torrenciales tuvieron valores de HAND mayores que las otras cuencas. Para el percentil 90, la mayoría de las cuencas torrenciales se situaron en valores de 100 a 200 m, mientras que las cuencas trazadas aleatoriamente, en valores menores a 100 m.

EL HAND ha sido un índice ampliamente usado por autores como S. Chen et al. (2023); Dhote et al. (2023); Unnithan et al. (2023) para determinar zonas inundables a partir de

cierto umbral. Por ejemplo, Dhote et al. (2023) compararon la mancha de inundación hallada a partir de un modelo hidrodinámico con la hallada mediante el índice HAND.

En estos casos, se ha utilizado el índice para definir zonas de inundación lenta, referida a acumulación de la escorrentía, donde los valores pequeños de HAND significan poca diferencia de altura entre un pixel de la cuenca y su drenaje más cercano, por lo que es altamente probable que se inunde. En el presente trabajo, se encontró que valores altos de HAND favorecen flujos rápidos y mayor probabilidad de desencadenamiento de eventos torrenciales. En este sentido, según se observa en la **Figura 2-6**, los valores más bajos de HAND se presentaron en los pixeles más próximos a la red de drenaje, mientras que los más altos, en las laderas, donde posiblemente se tenga generación de flujos rápidos o torrenciales.

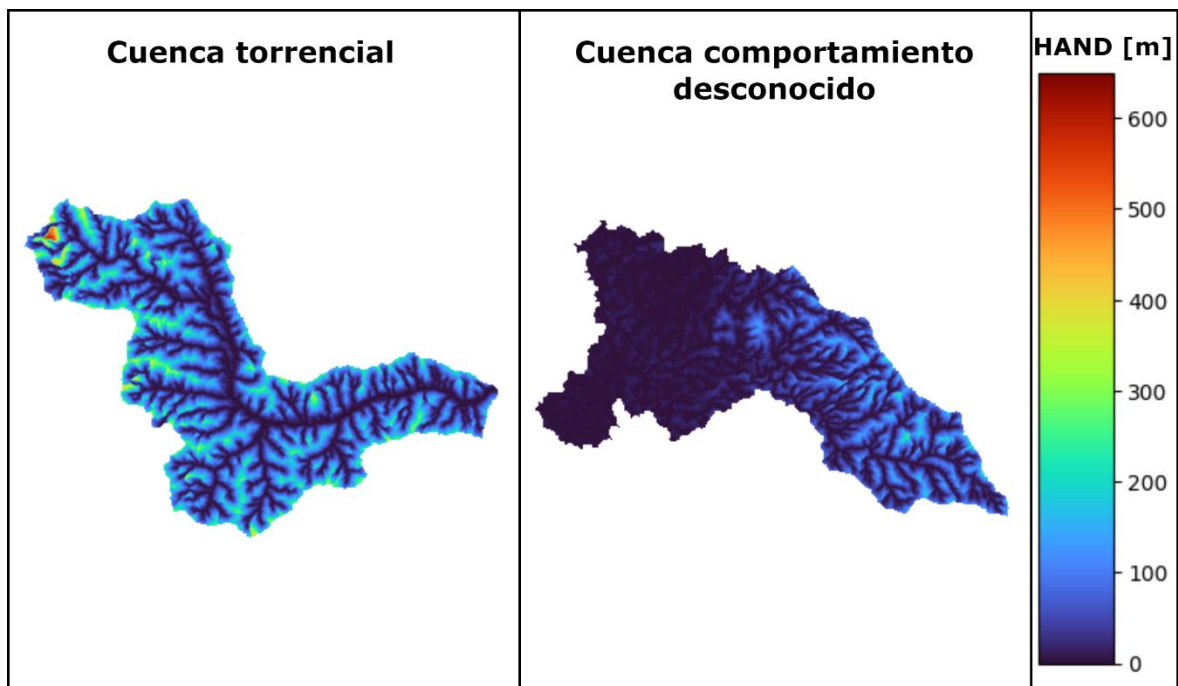


Figura 2-6: Distribución espacial del índice geomorfológico HAND en dos cuencas analizadas.

El índice geomorfológico rDUNE (reduced dissipation per unit length index) es un índice desarrollado por Loritz et al. (2019), el cual es una reinterpretación del HAND, en la medida que considera la diferencia de energía potencial, así como la pérdida disipativa acumulada

a lo largo de la ruta de flujo, siguiendo argumentos termodinámicos. Este índice está basado en el balance de energía asociado a la generación de flujo en una ladera, teniendo en cuenta las fuerzas que manejan la generación de escorrentía y la resistencia al flujo del agua que es ofrecida por el terreno. Esto se materializa en la relación del HAND con el HDND (Horizontal Distance to the Nearest Drainage). Cuando se tiene un valor de HAND alto y uno de HDND bajo, significa una ladera muy inclinada, es decir, que el terreno se eleva rápidamente lejos de la corriente (Rennó et al., 2008), lo que conlleva implicaciones hidrológicas.

En los resultados obtenidos en este estudio, se observó que el índice tiene una relación inversa con la torrencialidad, dado que mostró valores más pequeños para cuencas torrenciales, mientras que las cuencas aleatorias se concentraron en valores más altos.

En general, el análisis agregado por medio de percentiles mostró diferencias entre ambos grupos de cuencas. Para el caso, por ejemplo, del percentil 90, se tuvieron valores en el rango de 1.5 a 2.5 de rDUNE para cuencas torrenciales, mientras que el otro grupo tuvo la mayoría de sus valores entre 2.0 y 3.0.

Según Loritz et al. (2019), gran parte de la energía potencial se disipa en el proceso de generación de escorrentía. Los valores altos de rDUNE significan que hay menor disipación de energía potencial, y por lo tanto menor generación de escorrentía, en comparación con cuencas que tienen valores más bajos de rDUNE.

En el estudio de Kallio et al. (2019) usan el índice DUNE, equivalente al rDUNE sin multiplicarlo por $-\ln$, para diferenciar topografías, asumiendo que se generan mayores escorrentías en cuencas que tienen mayor diferencia de elevación y menor valor de rDUNE.

En el caso del estudio de Loritz et al. (2019), el índice rDUNE fue el mayor diferenciador entre dos grupos de cuencas con geologías y regímenes de escorrentía diferentes, donde los valores más altos del índice se obtuvieron en paisajes en los que el proceso de escorrentía dominante se caracteriza por el flujo a través de una ruta preferencial.

En la **Figura 2-7** se presenta el índice geomorfológico rDUNE en dos cuencas analizadas, una torrencial y otra con comportamiento desconocido. Se evidenció que la cuenca torrencial tuvo más cantidad de píxeles en valores de 0.0 a 2.0 y que los valores más altos están asociados a la red de drenaje, que sigue una ruta de flujo preferencial, en correspondencia con el estudio de Loritz et al. (2019).

Se observó además que la cuenca con comportamiento desconocido tuvo la mayoría de sus píxeles en valores mayores a 2.0, principalmente aguas abajo. Los píxeles con menor valor de rDUNE se concentraron en la parte alta de la cuenca, donde hay una mayor generación de escorrentía.

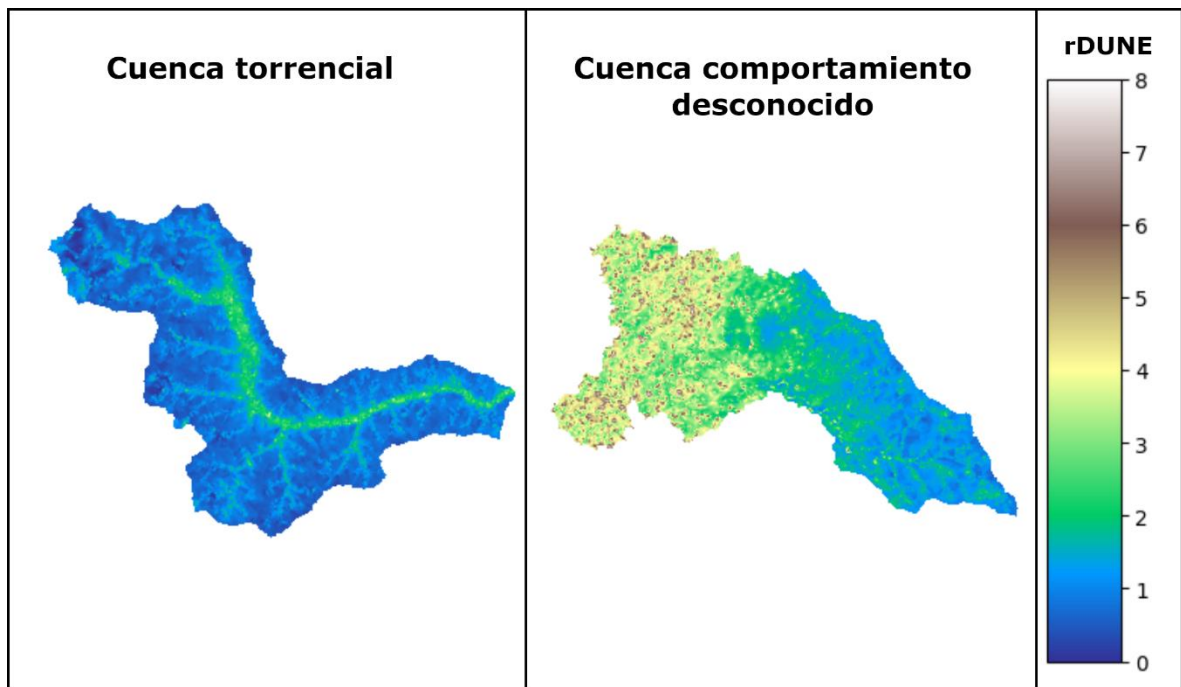


Figura 2-7: Distribución espacial del índice geomorfológico rDUNE en dos cuencas analizadas.

- **Variables relacionadas con el mapa del suelo del departamento de Antioquia**

Las FDP y FDA de las cinco variables estimadas a partir del mapa de suelos del departamento de Antioquia se muestran en la **Figura 2-8**.

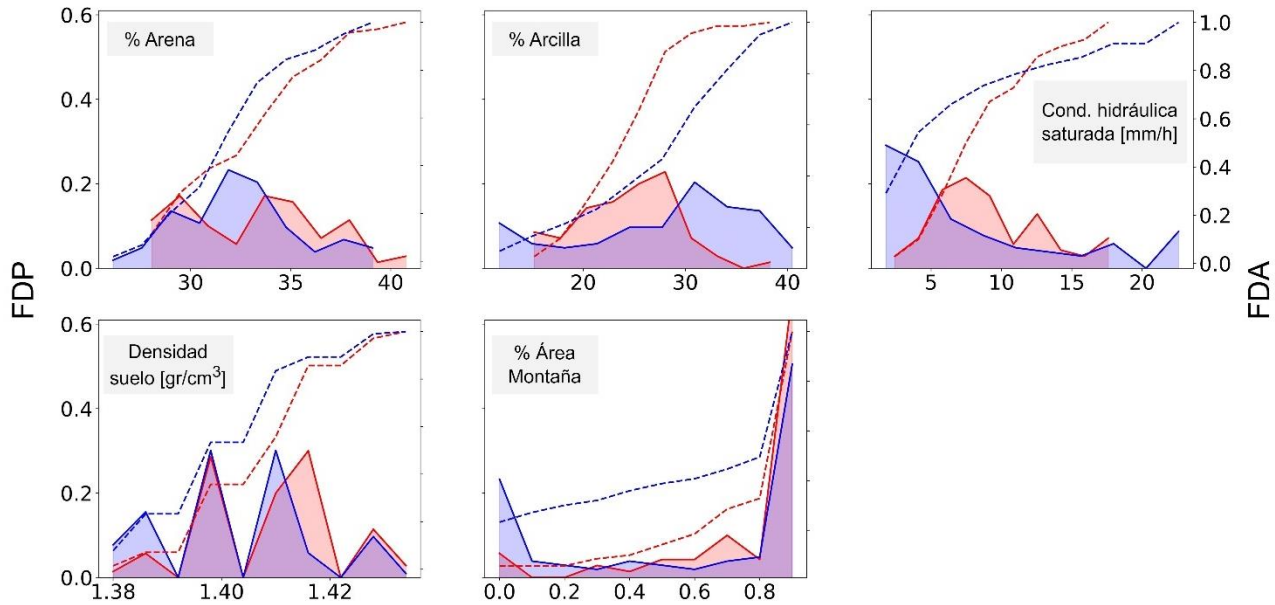


Figura 2-8: FDP y FDA de variables asociadas con el mapa de suelos, departamento de Antioquia. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.

Se observó que las variables que mejor contrastan los grupos de cuencas analizadas en este estudio son porcentaje de arcilla y conductividad hidráulica saturada. Por su parte, densidad del suelo y porcentaje del área de la cuenca en la categoría de paisaje “montaña” no se consideraron concluyentes a la hora de diferenciar las cuencas de este estudio ya que sus FDP se traslaparon.

El valor promedio de % de arcilla en cuencas torrenciales fue 25.6%, mientras que, en cuencas aleatorias, fue mayor, correspondiente a 29.1%. Por su parte, la conductividad hidráulica saturada en el primer grupo de cuencas fue 9.9 mm/h, mientras que para el segundo fue de 8.6 mm/h. Si bien no son diferencias muy grandes, son las mayores diferencias promedio entre las variables de suelo analizadas.

En estudios realizados por Costache et al. (2020); Riazi et al. (2023); Taha et al. (2017) se han considerado además de variables morfométricas, otras variables como textura, tipo de suelo, litología/geología, coberturas naturales y usos del suelo. Si bien se ha determinado que las características del suelo influyen la generación de inundaciones y flujos rápidos,

resultan teniendo menor importancia que variables relacionadas con el relieve u otros parámetros morfométricos.

En el caso de las variables analizadas a partir del mapa de suelos de Antioquia, se evidenciaron todavía muchas falencias en cuanto a la homogenización, clasificación y presentación de la información proveniente de la fuente, pues fue complejo agrupar las características o atributos de modo que se pudieran realizar mejores análisis y comparar con otros estudios.

2.4.2 Importancia de variables morfométricas, geomorfológicas y de suelos en cuencas de estudio

De acuerdo con los resultados anteriores, es claro que algunas de las variables evaluadas pueden ser más importantes a la hora de comparar entre ambos grupos de cuencas, puesto que se observaron marcadas diferencias en las funciones de densidad de probabilidad y densidad acumulada.

Se analizaron las tres métricas propuestas en la sección 2.3 Metodología - 2.3.2 Índice de importancia, con el fin de evidenciar las variables más diferenciadoras entre los grupos de cuencas analizados. Se realizaron 500 iteraciones para establecer la distribución de importancia de cada variable.

En la **Figura 2-9** se presenta el grado de importancia de las variables para cada una de las métricas analizadas.

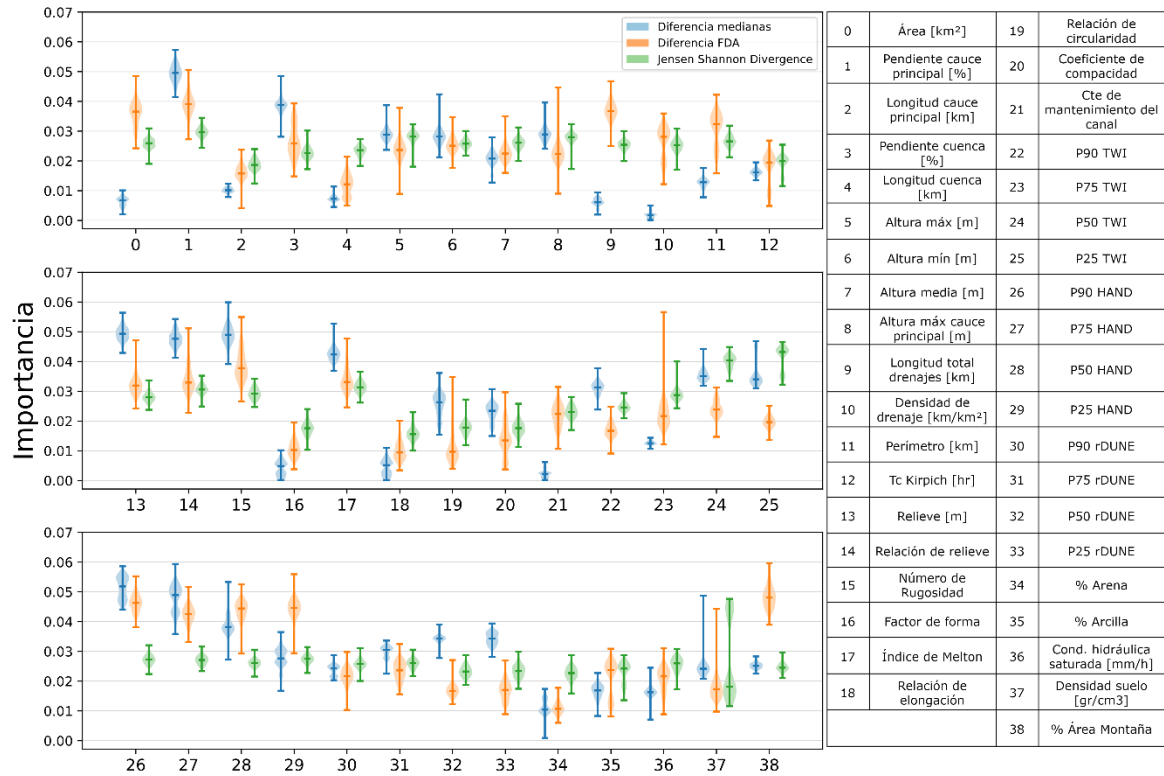


Figura 2-9: Índice de importancia de variables morfométricas, geomorfológicas y de suelos.

De acuerdo con la diferencia de las medianas, las variables: constante de mantenimiento del canal, densidad de drenaje, relación de elongación y factor de forma fueron los parámetros menos significativos a la hora de definir torrencialidad en las cuencas analizadas, ya que la mediana del índice de importancia se ubicó en valores menores a 0.01.

Con respecto a la métrica (2) diferencia FDA, las variables menos significativas fueron: relación de elongación, longitud total de drenajes, perímetro y área. Finalmente, la métrica (3) divergencia Jensen-Shannon mostró que las variables con menor importancia fueron longitud del cauce principal, área, factor de forma y relación de elongación.

Para todas las métricas evaluadas, coincidió que las variables más importantes estuvieron relacionadas con las características del relieve, es decir, las derivadas de la pendiente y la

altura de la cuenca, como pendiente del cauce principal, relieve, relación de relieve, número de rugosidad, altura mínima, índice de Melton y los índices HAND y TWI.

La métrica que mostró mejor desempeño fue la (3) Divergencia de Jensen Shannon, debido a que en general, tuvo menor dispersión que las demás, excepto en la variable 37 densidad del suelo. La métrica diferencia FDA presentó la mayor dispersión.

En los últimos años se han utilizado ampliamente técnicas de machine learning para resolver problemas de todo tipo, en diferentes áreas del saber. Se han encontrado estudios que han tenido como objeto la predicción de flujos torrenciales y la definición de las variables más relevantes en cuencas con comportamiento torrencial (Xiong et al., 2020).

A pesar de esto, es conocido que éstas son técnicas de “caja negra”, donde se ingresan una serie de inputs, se hace el procesamiento por medio de los algoritmos y finalmente se obtiene una salida de predicción. En este sentido, se tiene poco control sobre las variables y la ejecución del algoritmo. En el caso del presente estudio, con las métricas utilizadas se logró tener conocimiento del comportamiento de las variables evaluadas, además de tener un algoritmo donde se controló el proceso en cada paso.

Se han utilizado técnicas de inteligencia artificial para modelar la distribución espacial de eventos torrenciales y priorizar las variables más importantes que controlan este tipo de eventos. En Zhao et al. (2021) se evaluaron 40 variables para definir las más importantes que controlan el comportamiento torrencial en una zona.

En Qing et al. (2020) definieron un mapa de susceptibilidad en una zona al norte de Pakistán y el noroeste de China a partir de la aplicación de machine learning, además de definir los factores más importantes que determinan la susceptibilidad a flujos torrenciales en esa área de estudio, donde el índice de Melton fue el parámetro más importante, seguido de densidad de drenaje, integral hipsométrica y pendiente promedio.

En el estudio de Arango et al. (2021) se analizaron cuencas tropicales ubicadas en los Andes Colombianos, donde por medio de técnicas de machine learning se seleccionaron las variables predictoras más importantes. La relación de relieve, la constante de mantenimiento del canal, el índice de Melton, relieve y factor de forma fueron las variables

con importancias más altas en los métodos de inteligencia artificial empleados. En el presente estudio, las características del relieve tuvieron un papel fundamental en la susceptibilidad a flujos torrenciales.

2.4.3 Clasificación de cuencas con comportamiento desconocido

De acuerdo con los resultados, las variables geomorfológicas de algunas de las cuencas aleatorias coincidieron con las cuencas torrenciales. En este sentido, se buscó clasificar este grupo con base en el análisis de importancia.

Conforme a la metodología, se compararon las variables de cada cuenca con respecto al percentil 5 y 95 del grupo de cuencas torrenciales, ubicándola en un comportamiento torrencial o no torrencial para cada variable evaluada. Siendo la importancia un factor ponderador, se clasificaron las cuencas en alta, media o baja propensión a la torrencialidad. Los resultados se muestran en la **Figura 2-10**.

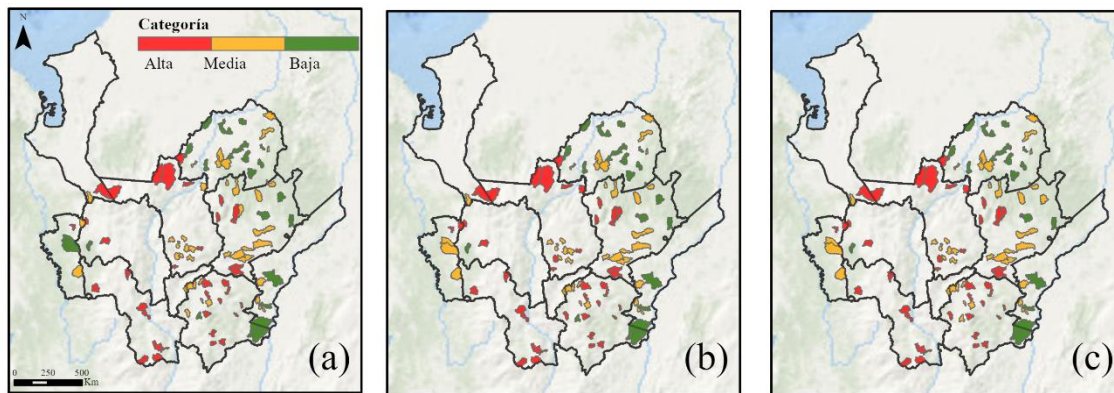


Figura 2-10: Clasificación de cuencas con comportamiento desconocido, con base en cada métrica evaluada: (a) diferencia de medianas, (b) diferencia de FDA, (c) Divergencia Jensen-Shannon

En general, las tres métricas analizadas clasificaron de una manera muy similar las cuencas con comportamiento desconocido. Se evidenciaron cuencas altamente propensas a la torrencialidad en el cinturón de la Cordillera Occidental, desde la subregión del

suroeste hasta la zona del Nudo del Paramillo (subregión Occidente), donde se tienen condiciones topográficas más complejas.

También se encontraron cuencas potencialmente torrenciales sobre la Cordillera Central, especialmente en la subregión Oriente. Resulta interesante destacar que sobre esta cordillera se tienen cuencas con tendencia media a la torrencialidad ubicadas sobre los altiplanos del norte y el oriente antioqueño, donde se tienen condiciones de relieve más suaves, con paisajes asociados a depósitos fluviales y terrazas (Hermelín, 2003), dejando ver nuevamente la diversidad topográfica del departamento.

Por su parte, las cuencas que mostraron baja propensión a la torrencialidad se ubicaron en las zonas más planas del departamento, asociadas al Valle Medio del Magdalena (zona oriental), las llanuras del bajo cauca (zona nororiental) y el Valle del Atrato (zona occidental).

2.4.4 Validación de métodos de clasificación de cuencas

La validación de resultados se realizó conforme a la metodología expuesta en la sección 2.3.4. En este caso, se realizaron 1000 iteraciones para definir la distribución del error para cada métrica, variando la muestra de cuencas torrenciales. Con esto, se quería evidenciar si la cantidad de cuencas torrenciales conocidas afecta el desempeño de las predicciones.

En la **Figura 2-11** se presenta el diagrama de cajas con la distribución del error mencionada anteriormente.

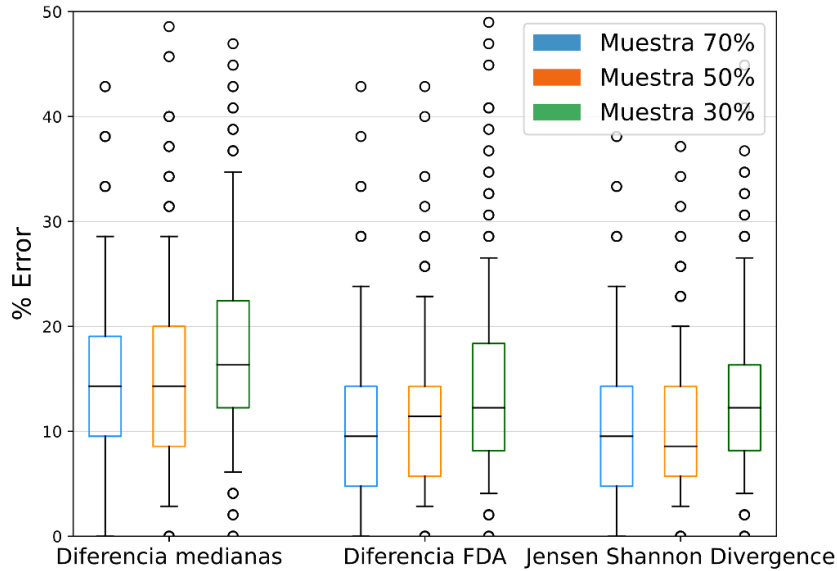


Figura 2-11: Distribución del error asociado a las métricas de clasificación de cuencas.

El porcentaje de error corresponde a las veces que el método no clasificó las cuencas torrenciales de validación en alta probabilidad de torrencialidad. La caja está representada por el Q1, Q2 (mediana) y Q3. Los bigotes corresponden a los percentiles 5 y 95 de la muestra.

El método de diferencia de medianas presentó en general mayores errores con respecto a los otros dos métodos. El mejor desempeño se tuvo con el método de Divergencia de Jensen Shannon, donde la mediana de los errores se encuentra sobre 10%. Con respecto a la variación de la muestra de cuencas torrenciales conocidas, se evidenció que, si se conocen menos cuencas torrenciales, el desempeño del modelo disminuye.

El error se asocia principalmente a que las variables morfométricas, geomorfológicas y de suelo evaluadas pueden no alcanzar a explicar totalmente el comportamiento torrencial de una cuenca, pues es conocido que el factor detonante relacionado con la precipitación es también un controlador importante de este tipo de eventos. En el siguiente capítulo, se abordará detalladamente esta variable, de modo que se pueda entender el papel que juega en el desencadenamiento de eventos torrenciales y en la clasificación de cuencas.

2.5 Conclusiones

Los resultados de los análisis morfométricos, geomorfológicos y de suelos de cuencas que reportan eventos torrenciales en el departamento de Antioquia indicaron algunos valores característicos donde coinciden este tipo de cuencas. La evaluación de variables morfométricas e índices geomorfológicos, a partir de insumos básicos como los modelos de elevación digital, podría establecer si una cuenca tiene tendencia a la torrencialidad, desde el punto de vista de su geomorfología.

Las variables asociadas a las condiciones geomorfológicas y topográficas del territorio que tuvieron mayor importancia para el estudio de cuencas torrenciales en el departamento de Antioquia fueron TWI, índice de Melton, pendiente del cauce principal, relieve, relación de relieve y número de rugosidad. Todas ellas relacionadas con las características del relieve, convirtiéndose en un factor determinante para el desencadenamiento de eventos torrenciales en la región.

La clasificación de cuencas con comportamiento desconocido mostró resultados coherentes con las condiciones topográficas de Antioquia, donde se espera que las cuencas más propensas a presentar eventos torrenciales se ubiquen en inmediaciones de las cordilleras Central y Occidental, a las cuales se asocian relieves más escarpados y topografías más complejas. Sin embargo, se tuvo un porcentaje de error cercano al 10% en las métricas utilizadas para dicha clasificación, siendo la Divergencia de Jensen Shannon la que mejor desempeño logra.

Estos resultados aportan al entendimiento de las características topográficas y geomorfológicas en las cuales se presentan eventos torrenciales en Antioquia, lo cual se debe tener en cuenta para una adecuada gestión del riesgo de desastres en el territorio. Sin embargo, el análisis completo de este tipo de fenómenos naturales debe considerar una visión global del problema, en la cual, la precipitación, tiene un papel fundamental. Es por ello, que el siguiente capítulo se enfoca en analizar a mayor profundidad las características de la precipitación en las cuencas estudiadas.

3.El papel de la lluvia en la identificación de cuencas potencialmente torrenciales

3.1 Introducción

Las avenidas torrenciales son actualmente una de las principales amenazas naturales a nivel mundial, causando cada año, numerosos daños y pérdidas humanas (Amengual et al., 2021; Henao Salgado & Zambrano Nájera, 2022). Los eventos torrenciales están asociados con precipitaciones cortas pero muy intensas, principalmente de origen convectivo y con alta variabilidad espacial (Borga et al., 2011; Douinot et al., 2016; Gaume et al., 2009; Marchi et al., 2010).

Los análisis de precipitación asociada a eventos torrenciales se han enfocado en la definición de umbrales críticos de lluvia a partir de los cuales se pueden presentar este tipo de eventos. Dichos umbrales se pueden definir usando métodos empíricos a partir de datos históricos, pero también se han usado métodos hidrológicos o hidrodinámicos, probabilísticos y compuestos. La definición de umbrales se ha convertido en una herramienta importante para los sistemas de alerta temprana (Aristizábal et al., 2011, 2017; Aristizábal, Gamboa, et al., 2010; Ávila et al., 2015; Guzzetti et al., 2007; Henao Salgado & Zambrano Nájera, 2022; Moreno et al., 2006; Santos & Fragoso, 2016; Segoni et al., 2018; Young et al., 2021).

También se han usado enfoques de machine learning para definir las variables más importantes en el desencadenamiento de eventos torrenciales, en las cuales se han incluido indicadores generales de lluvia (Oh et al., 2021; Ponziani et al., 2023; Pradhan et

al., 2019; Qing et al., 2020; Ullah et al., 2022; R. Zhang et al., 2022; Y. Zhang et al., 2019; Zhao et al., 2021, 2023).

La variabilidad y organización espacial de la precipitación tiene relación con el desencadenamiento de eventos torrenciales (Ruiz-Villanueva et al., 2012). Se han hecho estudios sobre casos específicos, lo cual, si bien aporta al entendimiento del problema, no permite hacer generalizaciones sobre el fenómeno (Amengual et al., 2021; Douinot et al., 2016; Saharia et al., 2021; Zoccatelli et al., 2011, 2013).

Una de las limitaciones que se tiene para analizar la precipitación asociada a eventos torrenciales es la poca instrumentación principalmente en cuencas susceptibles de presentar este tipo de eventos, que, por su tamaño y ubicación, carecen de sistemas de monitoreo (Sivapalan et al., 2012). Así mismo, según Borga et al. (2014), las redes pluviográficas pueden no alcanzar a capturar toda la variabilidad espacio temporal de la lluvia, importante para el análisis de flujos torrenciales.

Actualmente se cuenta con herramientas como radares meteorológicos que aportan información detallada sobre la precipitación. Específicamente en el departamento de Antioquia, se cuenta con el radar meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, operado por el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), el cual cubre aproximadamente el 90% del territorio antioqueño y entrega información detallada en términos espaciales y temporales (SIATA, 2023).

En este capítulo se utiliza la información detallada de precipitación aportada por el radar meteorológico operado por SIATA para realizar análisis de la precipitación desde diferentes puntos de vista para las cuencas de estudio que se encuentran en la cobertura del radar. Se empieza describiendo los datos del radar utilizados y las cuencas de estudio analizadas. Posteriormente se explica la metodología para el análisis agregado y distribuido de la precipitación.

Los resultados y discusión están divididos en tres secciones: en una primera sección, se abordará el estudio de la precipitación desde un análisis espacial agregado, donde se tomarán las series de tiempo de precipitación de cada cuenca durante el periodo de 2013 a 2022 y se propondrán indicadores que ayuden a entender el comportamiento de lluvia

en las cuencas de estudio. En este caso, se analizará la importancia de dichos indicadores en el desencadenamiento de eventos torrenciales. Se determinará el aporte que tiene el estudio de indicadores de lluvia en la clasificación de cuencas con comportamiento desconocido.

En la segunda y tercera sección, se analizará la precipitación antecedente de eventos torrenciales y la distribución espacial de la precipitación en cuencas donde se han reportado eventos torrenciales en el departamento de Antioquia. En este análisis se pretende llegar a inferencias generalizadas sobre el comportamiento de la lluvia antes y durante los eventos torrenciales. Finalmente se tendrán las conclusiones generales del capítulo.

3.2 Datos

La información utilizada en el presente capítulo se tomó a partir de las mediciones del radar meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual es operado por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA).

Este radar se encuentra ubicado en el corregimiento de Santa Elena, al este del municipio de Medellín. La información aportada por el radar cubre aproximadamente el 90% del territorio de Antioquia (SIATA, 2023), con un radio óptimo aproximado de 90 km desde su ubicación (ver **Figura 3-1**). La resolución temporal es 5 minutos y la espacial 128 m aproximadamente, siendo una fuente de datos detallada sobre el territorio. Se cuenta con registros desde 2013 hasta 2022.

La estimación cuantitativa de la precipitación (QEP) a partir de los datos de reflectividad aportados por el radar, se realizó por medio de la metodología propuesta por (Sepúlveda Berrío, 2015; Sepúlveda-Berrío & Hoyos, 2017).

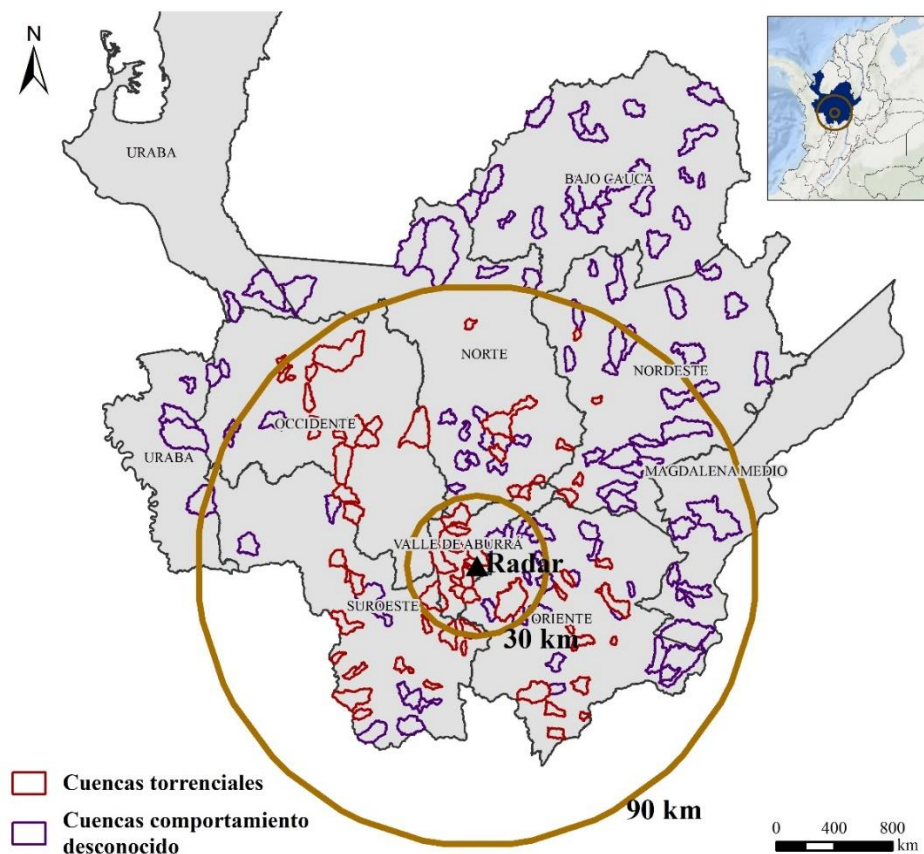


Figura 3-1: Zona de estudio y ubicación de radar meteorológico.

Para el análisis de este capítulo, se removieron las cuencas hidrográficas que no se encuentran en la cobertura de 90 km del radar meteorológico, debido a que no cuentan con información de precipitación de esta fuente. Dichas cuencas corresponden principalmente a las que tienen comportamiento desconocido y se ubican en la región del Bajo Cauca, Urabá y parte del Norte y Nordeste. Por esta misma razón se descartaron dos cuencas torrenciales que quedaban parcialmente por fuera de la cobertura del radar.

Adicionalmente se descartaron otras cinco cuencas torrenciales, debido a que no se contaba con información del radar para las fechas de los eventos torrenciales reportados. En total, el análisis de precipitación se realizó para 63 cuencas torrenciales y 57 cuencas aleatorias con comportamiento desconocido.

3.3 Metodología

El análisis del presente capítulo se realizó a partir de una metodología empírica, en la que se parte de las cuencas que se encuentran en la cobertura de los 90 km del radar meteorológico.

Se analizó el comportamiento espacial agregado de la precipitación en todas las cuencas de estudio y el comportamiento espacial distribuido solo en las cuencas con reporte de eventos torrenciales. Además, se realizó un análisis espacial agregado de la lluvia antecedente a los eventos torrenciales.

3.3.1 Análisis agregado de la precipitación en cuencas de estudio

El análisis agregado de la precipitación se realizó para todas las cuencas de estudio en la cobertura del radar meteorológico. Se definieron las series de tiempo para cada cuenca a partir de la media de todos sus píxeles, para cada paso de tiempo t . En este caso, se acumularon periodos horarios y diarios, a partir de los registros aproximadamente cinco minutales del radar meteorológico.

A partir de la precipitación agregada en cada cuenca y para todo el periodo de registro (2013-2022), se definieron indicadores que reflejaran el comportamiento de la lluvia, con el fin de comparar entre cuencas torrenciales y cuencas trazadas aleatoriamente en la región.

Se utilizó además la librería radar de Python (<https://github.com/nicolas998/Radar>) para procesar las imágenes del radar meteorológico y clasificar la precipitación en convectiva y estratiforme, siguiendo la metodología de Steiner et al. (1995) desarrollada en Velásquez (2022).

La definición de indicadores se basó en algunos estudios que han trabajado indicadores relacionados con la lluvia (Aristizábal et al., 2011; Guerrero & Aristizábal, 2019; Guzzetti et al., 2007; Ma et al., 2021), sin embargo, estos se han enfocado generalmente en la

definición de umbrales a partir de los cuales se pueden desencadenar eventos torrenciales o movimientos en masa. También se revisaron estudios donde a partir de enfoques de machine learning, se evalúan los factores controladores de este tipo de eventos, entre ellos la lluvia (Qing et al., 2020; R. Zhang et al., 2022; Y. Zhang et al., 2019; Zhao et al., 2021).

Los indicadores de lluvia agregada en las cuencas de estudio tienen la intención de capturar diferentes características de la precipitación en la región, como el comportamiento horario, diario, acumulado y de lluvia convectiva, relacionada generalmente con el desencadenamiento de eventos torrenciales (Llasat et al., 2021). En total se definieron 15 indicadores, listados a continuación:

1. Promedio de la precipitación máxima horaria en un día [mm]
2. Percentil 95 de la precipitación máxima horaria en un día [mm]
3. Porcentaje promedio de la cuenca con lluvia convectiva en un día [%]: en promedio, cuánto porcentaje de la cuenca alcanza a cubrir un evento convectivo en un día
4. Cantidad de días con lluvia convectiva en todo el periodo de registro [días]
5. Precipitación máxima en un evento convectivo [mm/h]
6. Cantidad de días con $P > 30$ mm/día en todo el periodo de registro [días]
7. Cantidad de días con $P > 40$ mm/día en todo el periodo de registro [días].
8. Cantidad de días con $P > 50$ mm/día en todo el periodo de registro [días].
9. Cantidad de horas con $P > 5$ mm/h en todo el periodo de registro [horas].
10. Cantidad de horas con $P > 10$ mm/h en todo el periodo de registro [horas].
11. Cantidad de horas con $P > 20$ mm/h en todo el periodo de registro [horas].
12. Precipitación promedio acumulada en 30 días [mm]
13. Precipitación promedio acumulada en 60 días [mm]
14. Precipitación promedio acumulada en 90 días [mm]
15. Cantidad máxima de días consecutivos con lluvia en el periodo de registro [días]

Una vez obtenidos los indicadores para las cuencas de estudio, se siguió la metodología propuesta en el capítulo 2. Caracterización geomorfológica para realizar el análisis de importancia de los indicadores relacionados con la precipitación y su desempeño en la clasificación de cuencas. Por medio de la aplicación de la Ecuación 2.1, Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3 se hallaron las métricas de diferencia de cada variable de precipitación.

Posteriormente, aplicando la Ecuación 2.4 se determinó el indicador de importancia de las variables pluviales analizadas, para cada una de las métricas analizadas.

3.3.2 Análisis agregado de la precipitación antecedente de eventos torrenciales

Se analizó de forma agregada la lluvia antecedente hasta de 30 días en las cuencas donde se tienen eventos torrenciales reportados. En esta sección se pretendía observar de forma general el comportamiento de la lluvia que antecede un evento torrencial y definir si el patrón de precipitación antecedente es similar para todas las cuencas torrenciales analizadas.

Se definieron además algunos casos particulares donde se observaron comportamientos contrastantes en términos de lluvia antecedente del evento torrencial reportado, permitiendo hacer inferencias generales sobre el fenómeno.

3.3.3 Caracterización y análisis distribuido de la precipitación en cuencas torrenciales

El análisis distribuido de la precipitación en cuencas torrenciales se realizó a partir de la precipitación acumulada del día del evento torrencial distribuida en toda la cuenca, tomando pixel por pixel.

En primer lugar, se quería analizar la ubicación de los acumulados más altos de precipitación durante el día del evento y su relación con las condiciones geomorfológicas de las cuencas de estudio. Se tomaron cuencas de referencia para definir comportamientos característicos.

En segundo lugar, se analizó la precipitación convectiva relacionada con los eventos torrenciales, dado que algunos autores han mencionado la importancia que tienen los

sistemas convectivos en la generación de flujos rápidos o torrenciales (Llasat et al., 2021; Velásquez, 2022).

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Caracterización y análisis agregado de la precipitación

El análisis agregado de la precipitación se realizó con el fin de determinar características de la lluvia en las cuencas de estudio y si ésta tenía comportamientos diferenciadores entre cuencas torrenciales y cuencas con comportamiento desconocido.

La Figura 3-2 muestra las funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada de los indicadores definidos para este análisis. En general, el comportamiento de la lluvia en ambos grupos de cuencas fue similar, es decir, las características de la lluvia agregada en el periodo de tiempo analizado no lograron ser un factor diferenciador entre los dos grupos a partir de las funciones de densidad analizadas.

Lo anterior puede explicarse por la distribución espacial de la lluvia en Antioquia, la cual está influenciada por la localización y topografía del departamento. En la zona central de Antioquia, donde están ubicadas la mayoría de las cuencas analizadas en esta sección, la lluvia depende del ascenso de aire húmedo que choca contra las cordilleras Occidental y Central (Poveda, 2006). De ahí que las características topográficas de esta zona, propias de los paisajes de los Andes, tengan gran influencia en la formación y dinámica espacio-temporal de la lluvia (López-Bermeo et al., 2022).

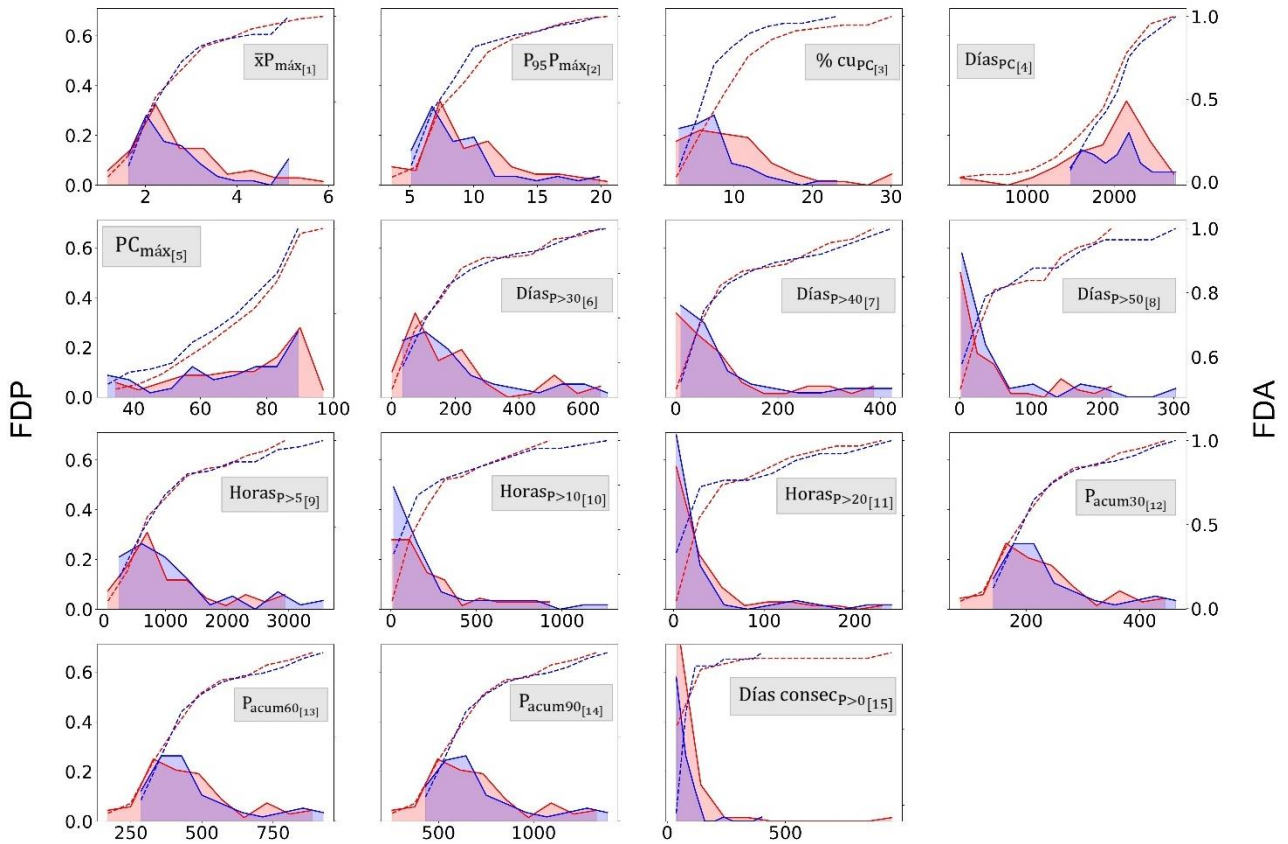


Figura 3-2: FDP y FDA indicadores de precipitación. El color rojo corresponde a las cuencas torrenciales y el azul a las cuencas aleatorias.

Los indicadores relacionados con la lluvia convectiva fueron los que evidenciaron mayores diferencias entre los dos grupos de cuencas analizadas. Para el grupo de cuencas torrenciales, el porcentaje promedio de la cuenca con lluvia convectiva en un día llegó incluso hasta 30% y los días con lluvia convectiva durante el periodo de registro han estado entre 2000 y 2500 para más del 30% de cuencas torrenciales.

Con respecto a los indicadores relacionados con la precipitación diaria, la cantidad de días con lluvia mayor a 30, 40 y 50 mm/día, aunque fue similar en ambos grupos, es particular que algunas cuencas torrenciales coinciden en valores alrededor de 500, 300 y 150 días respectivamente.

Un caso similar sucedió con la precipitación promedio acumulada en 30, 60 y 90 días, donde algunas cuencas torrenciales concordaron en valores de 350, 700 y 1100 mm

respectivamente, indicando una diferencia con respecto al otro grupo. La mayoría de las cuencas analizadas tuvieron precipitaciones promedio acumuladas en 90 días entre 500 y 650 mm, coincidiendo con lo reportado por Aristizábal et al. (2011) donde la lluvia acumulada antecedente de movimientos en masa para el Valle de Aburrá tuvo un umbral máximo de 640 mm en 90 días.

La comparación de cantidad de horas con precipitación mayor a 5, 10 y 20 mm/h en las cuencas de estudio no mostró diferencias claras, especialmente para 10 y 20 mm/h. Finalmente, la cantidad máxima de días consecutivos con lluvia fue mayor en cuencas torrenciales.

Los indicadores de precipitación agregada presentados en este estudio son innovadores, en el sentido que se trató de explorar las series de tiempo de lluvia de las cuencas desde diversas perspectivas, tratando de aprovechar la resolución temporal y el conocimiento sobre el tipo de lluvia presentado en la cuenca.

En análisis con enfoques de machine learning, donde se han estudiado características de la lluvia como factor detonante de eventos torrenciales, se han propuesto indicadores generales como frecuencia anual promedio de lluvia mayor a 15, 20, 30, 40 y 50 mm/día (Zhao et al., 2021, 2023) y precipitación promedio anual (Qing et al., 2020; Ullah et al., 2022; Y. Zhang et al., 2019).

De otro lado, estudios de Hirschberg et al. (2021); Zhao et al. (2022) han propuesto indicadores extraídos de las series de tiempo de lluvia a partir de algoritmos, que incluyen características relacionadas con la intensidad, duración y lluvia antecedente, los cuales han ido más allá de los comúnmente usados.

El análisis de la importancia de las variables de precipitación se presenta en la Figura 3-3.

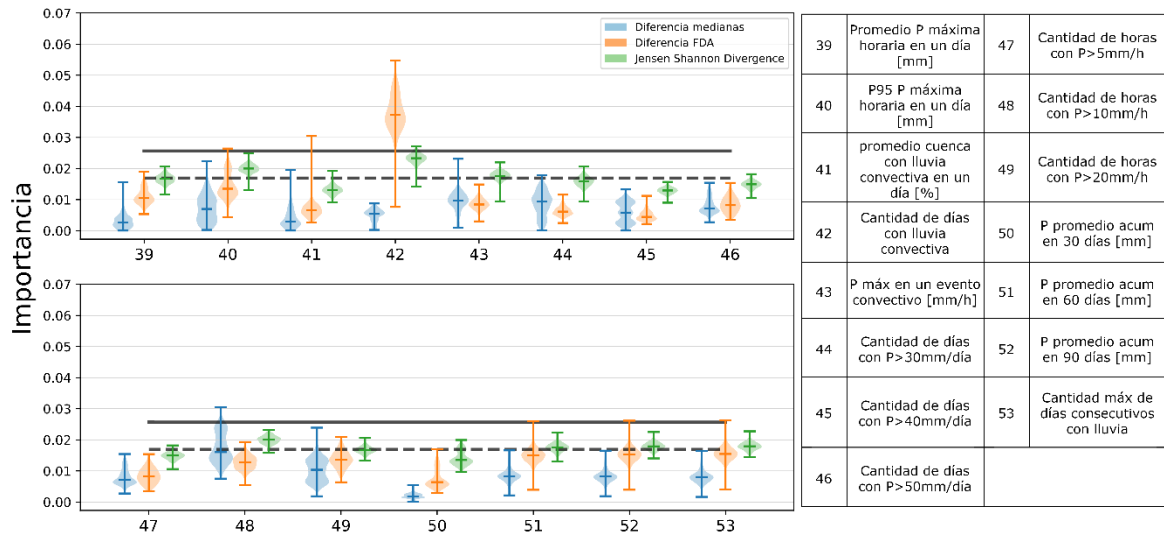


Figura 3-3: Índice de importancia de indicadores de precipitación. Las líneas corresponden a la importancia promedio para el método de divergencia de Jensen Shannon de las variables de geomorfología, morfometría y suelos (línea continua) e indicadores de precipitación (línea punteada)

La métrica (1) diferencia de medianas (Ecuación 2.1) presentó como indicador más importante la cantidad de horas con P>10 mm/h. Los demás, conservaron importancias muy bajas, alrededor de 0.01, en la escala de 0.00 hasta 0.07.

El indicador más importante en la métrica (2) diferencia FDA (Ecuación 2.2) fue cantidad de días con lluvia convectiva, sin embargo, presentó una alta dispersión. Los demás indicadores presentaron importancias bajas. Esta métrica tuvo la mayor dispersión de las tres usadas, por lo que los valores de importancia pueden ser muy variables.

Finalmente, la métrica (3) Divergencia de Jensen Shannon (Ecuación 2.3) fue la que mejor desempeño tuvo en el análisis de importancia, por su poca dispersión. Además, presentó importancias más altas en comparación con las otras dos métricas, donde se destacaron los indicadores: cantidad de días con lluvia convectiva, percentil 95 de precipitación máxima horaria en un día, cantidad de horas con P>10 mm/h, precipitación promedio acumulada en 90 días y cantidad máxima de días consecutivos con lluvia, como los más importantes.

Las líneas presentadas en la Figura 3-3 representan la importancia promedio para el método de divergencia de Jensen Shannon de las variables de geomorfología, morfometría y suelos (línea continua) y de los indicadores de lluvia (línea punteada). Se observó que, aplicando la metodología planteada en este estudio, la geomorfología de las cuencas tiene en promedio, mayor importancia que la precipitación.

En otros estudios donde se ha analizado la importancia de factores controladores de flujos torrenciales, incluyendo variables relacionadas con la geología, el suelo, la geomorfología y la precipitación, se ha encontrado que esta última no ha sido la principal controladora de los flujos torrenciales en las cuencas analizadas. En Zhao et al. (2021), la litología fue el factor controlador más importante y en Lv et al. (2023); Qing et al. (2020); Y. Zhang et al. (2019), fueron la topografía y geomorfología.

En congruencia con lo anterior, los resultados del análisis de importancia presentados en este estudio dejaron ver que, si bien algunos indicadores de precipitación son importantes como factor controlador de eventos torrenciales, incluso más que algunas variables geomorfológicas o morfométricas (analizadas en el capítulo anterior), la geomorfología es fundamental ya que propicia el desencadenamiento del evento. En este caso, el hecho de tener condiciones de precipitación similares en todas las cuencas analizadas hace que el factor relacionado con la geomorfología marque la diferencia en términos de desencadenamiento de eventos torrenciales.

Se realizó la validación de los métodos de clasificación de cuencas incluyendo los indicadores de precipitación. Para esto, se utilizó la misma metodología propuesta en el capítulo Caracterización geomorfológica, donde se validó con base en las cuencas torrenciales conocidas.

En la Figura 3-4 se compararon los porcentajes de error obtenidos cuando se tiene en cuenta solamente la geomorfología (diagramas de caja sin relleno) y cuando se agregan los indicadores de precipitación (diagramas de caja con relleno). El porcentaje de error corresponde a las veces que el método no clasificó la cuenca como torrencial.

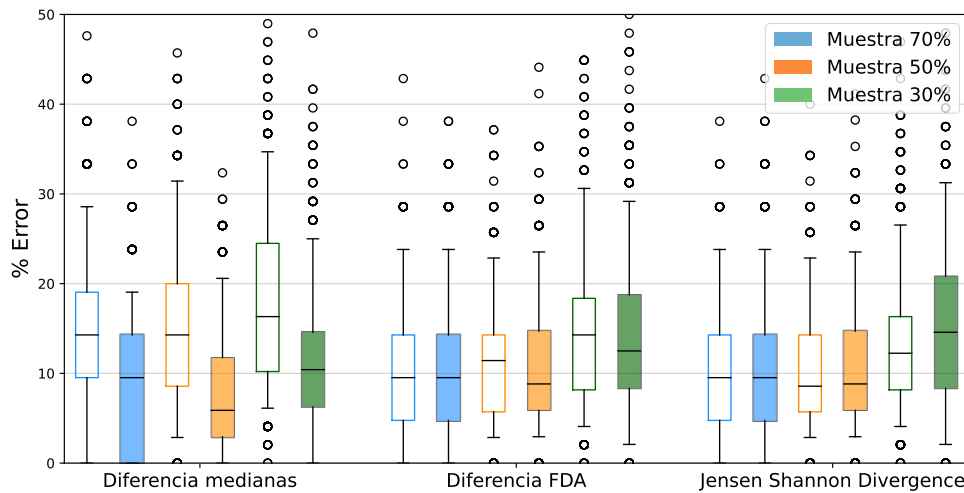


Figura 3-4: Distribución del error asociado a las métricas de clasificación de cuencas. Los diagramas de caja sin relleno corresponden a la distribución del error sólo con variables geomorfológicas y los diagramas con relleno corresponden a la distribución del error incluyendo los indicadores de precipitación.

Con respecto a la métrica (1) diferencia de medianas, al incluir los indicadores de precipitación, se logró mejorar el porcentaje de error para todas las muestras. La mediana de los errores se ubicó por debajo del 10%, mientras que solo con variables geomorfológicas, se ubicó sobre el 15%.

La métrica (2) diferencia promedio entre FDA, mostró una distribución del error muy similar entre los diagramas de caja de variables geomorfológicas y los que incluyen precipitación. Para la muestra de 70% de cuencas torrenciales, no se evidenciaron diferencias, sin embargo, las muestras de 50% y 30% mejoraron la mediana de los errores cuando se incluyeron los indicadores de precipitación, notándose la importancia de incluir estas variables en los análisis.

Finalmente, la métrica (3) Divergencia de Jensen Shannon fue la que menos impacto tuvo al incluir los indicadores de precipitación. La muestra de 70% conservó los mismos errores, mientras que la de 50% fue muy similar, aunque la mediana del error aumentó levemente. Particularmente, en la muestra de 30%, el hecho de incluir las variables relacionadas con lluvia aumentó el error y la dispersión, con lo que se infiere que los indicadores de

precipitación pueden traer mayor incertidumbre cuando se tiene menor muestra de cuencas torrenciales conocidas.

En términos generales, el hecho de incluir indicadores de precipitación en los análisis mejoró el rendimiento promedio de los métodos utilizados para clasificación de las cuencas. Por lo tanto, el entendimiento de fenómenos de carácter torrencial se ve beneficiado cuando se analizan en conjunto variables geomorfológicas y de precipitación.

3.4.2 Análisis agregado de la precipitación antecedente de eventos torrenciales

Los análisis de lluvia antecedente de eventos como movimientos en masa o avenidas torrenciales generalmente se desarrollan sobre casos de estudio particulares, una cuenca hidrográfica o una región en donde han ocurrido uno o varios eventos de ese tipo (Cabral et al., 2023; Santos & Fragoso, 2016; Segoni et al., 2018; Young et al., 2021).

En el presente estudio, se hizo un análisis en el cual se compararon diferentes cuencas hidrográficas del departamento de Antioquia, donde cada una tiene una estimación de lluvia agregada para el periodo de 2013 a 2022, es decir, no se cuenta con una única serie de tiempo de precipitación.

La condición en común de estas cuencas es que se ha presentado por lo menos un evento torrencial en los últimos 10 años y a partir de ello, se buscó analizar de forma conjunta las condiciones de precipitación antecedente en las cuencas, teniendo en cuenta la fecha de ocurrencia del evento torrencial en cada una.

A partir de los datos de precipitación para todas las cuencas, se generó la distribución de lluvia acumulada para cada día antecedente al evento torrencial (hasta 30 días), donde por medio de un gráfico de violines (ver Figura 3-5), se mostró progresivamente el cambio de la mediana de la precipitación acumulada cada día antes del evento. De esta forma se logró analizar en conjunto el comportamiento de la lluvia los días antes de que se presente un evento torrencial en el territorio de Antioquia.

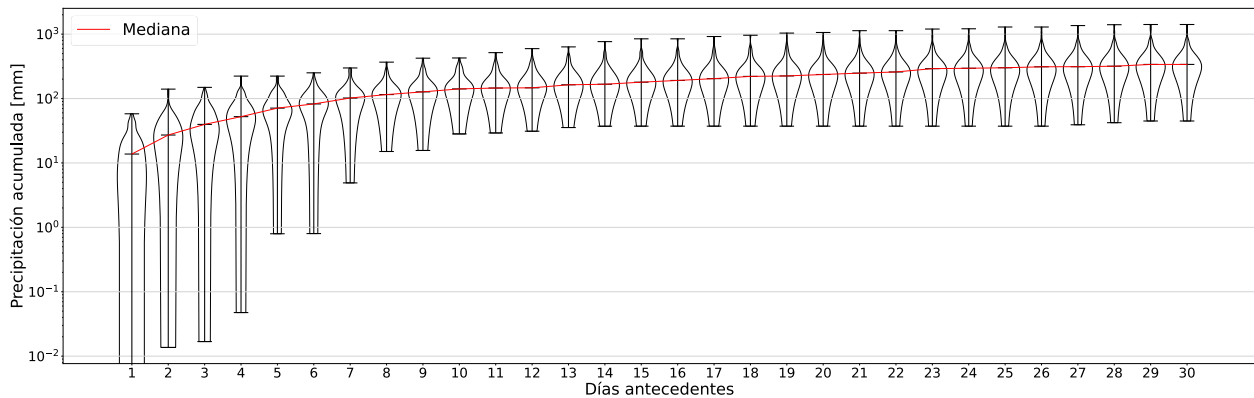


Figura 3-5: Distribución de la precipitación acumulada (escala logarítmica) para los 30 días antecedentes a un evento torrencial en las cuencas de estudio. Cada violín representa la distribución de los datos de lluvia en las 63 cuencas analizadas, para cada día antecedente al evento torrencial. La línea horizontal al interior corresponde a la mediana.

Se observó un ascenso constante y marcado de la mediana de la precipitación acumulada 10 días antes del evento, el cual, se estabilizó, con valores aproximadamente iguales los días 11 y 12. Desde el día 12 y aproximadamente cada 4 a 5 días, se produjo un cambio de pendiente en el comportamiento de la mediana de los datos, con una tasa decreciente respecto al inicio del período.

Lo anterior refleja mayor variabilidad de la lluvia acumulada en los días inmediatamente anteriores al evento (aproximadamente 10). En estos días, se aumentaron a mayor tasa los acumulados de lluvia, por lo que el suelo pudo tender a saturarse y finalmente se desencadenó el evento.

Aunque en los días 13 al 30 siguió en aumento la cantidad de precipitación acumulada, la tasa disminuyó, con lo que, por ejemplo, la mediana de la lluvia acumulada los días 24 al 28 (antes del evento), es semejante.

La literatura sobre el estudio de lluvia antecedente de movimientos en masa o avenidas torrenciales suele definir umbrales de precipitación crítica en los cuales se da la ocurrencia de este tipo de eventos. Dichos análisis se realizan generalmente a partir de métodos

empíricos, tomando datos históricos de eventos reportados, aunque también se han utilizado métodos hidrológicos, hidrodinámicos, probabilísticos y compuestos (Aristizábal et al., 2011; Ávila et al., 2015; Guerrero & Aristizábal, 2019; Henao Salgado & Zambrano Nájera, 2022; Segoni et al., 2018).

En este caso, más que la definición de umbrales, se analizó la cantidad de días óptimos en donde se pudiera definir una buena correlación entre la precipitación del día del evento y la precipitación antecedente acumulada.

La precipitación del día del evento en las cuencas analizadas varió desde 0 hasta 128 mm aproximadamente. Este rango coincide con lo presentado por Aristizábal et al. (2022) donde eventos de movimientos en masa en el piedemonte de la Amazonía occidental se han presentado con intensidades de lluvia similares.

En la Figura 3-6 se observa que hasta los 5 días antecedentes se tienen nubes de puntos muy dispersas, con valores muy bajos de correlación, en donde la precipitación acumulada antecedente no logró tener un comportamiento característico con respecto a la precipitación del día que se detonó el evento torrencial.

A partir del día 6 hasta el 11, empezaron a mejorar los coeficientes de correlación y se comenzó a dilucidar un comportamiento más estable. Finalmente, a partir del día 12 antecedente, se obtuvo una nube de puntos menos dispersa, comenzando a mejorar los coeficientes de correlación desde ese día hacia los posteriores.

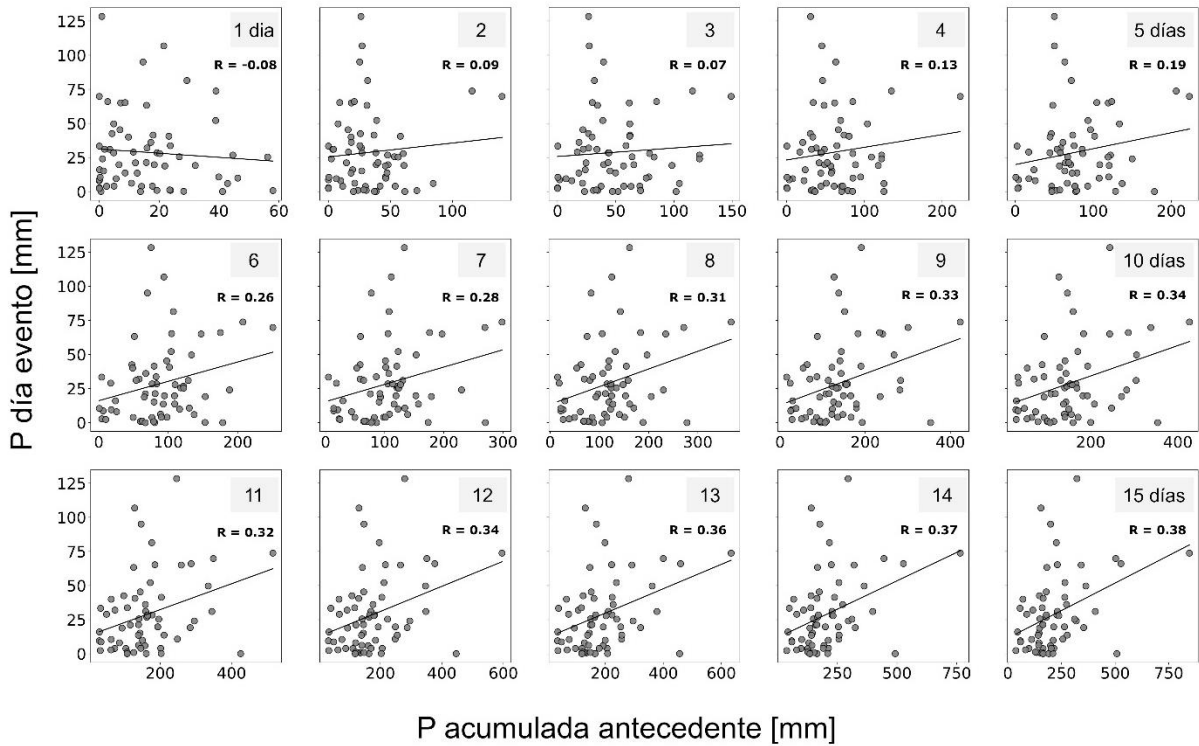


Figura 3-6: Precipitación acumulada antecedente de 1 a 15 días contra precipitación del día del evento torrencial en las cuencas de estudio. R corresponde al coeficiente de correlación de Pearson.

Se ha encontrado que periodos más largos de lluvia acumulada antecedente pueden representar mejor la ocurrencia de eventos detonados por lluvia. Los días óptimos o con mejores correlaciones suelen ser del día 15 al 90 (Aristizábal et al., 2011; Ávila et al., 2015; Moreno et al., 2006).

En la Figura 3-7 se observa como a partir del día 17 antes del evento torrencial, se lograron estabilizar las correlaciones de la precipitación acumulada antecedente y la precipitación del día del evento.

Aunque no se logró llegar a un valor de R óptimo, debido a que la precipitación del día del evento fue muy variable y a que se tuvieron relativamente pocos datos (63 cuencas), tendría más sentido proponer umbrales de lluvia crítica para el desencadenamiento de

eventos torrenciales a partir del día 17 antes del evento, de forma que no se encuentre tanta variabilidad asociada a los datos de precipitación.

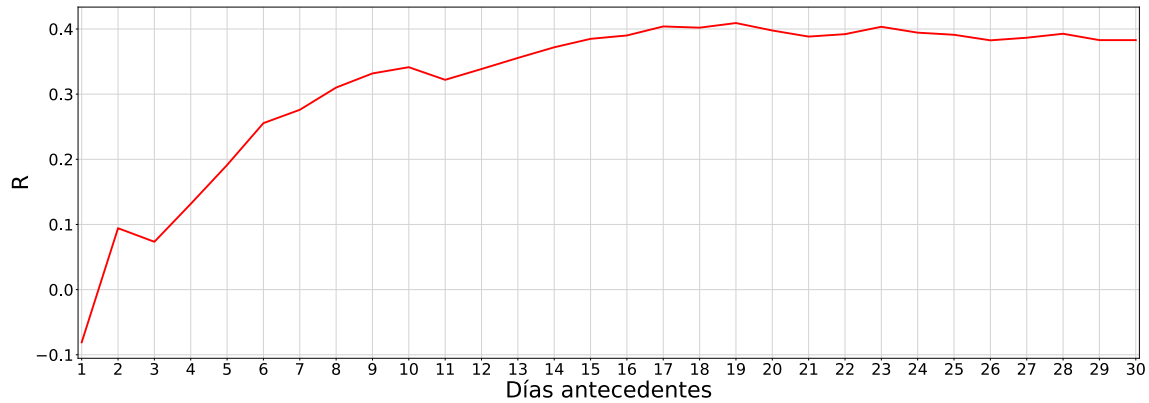


Figura 3-7: Coeficiente de correlación R entre precipitación acumulada antecedente y precipitación del día del evento, para los 30 días antes de la ocurrencia del evento torrencial.

Se evaluaron de manera particular las condiciones de precipitación antecedente de los eventos torrenciales ocurridos en las cuencas analizadas. Se encontraron dos patrones característicos: en uno, tiene mayor relevancia la precipitación del día del evento y en el otro, la importancia se concentra en la precipitación antecedente acumulada. En la Figura 3-8 se presentan cuatro subfiguras, cada una correspondiente a una cuenca diferente, donde se logran apreciar dichas características.

En la Figura 3-8 (a) y (c), se evidenció un gran cambio en el acumulado durante el día del evento torrencial; en el primer caso, el acumulado aumentó aproximadamente 60 mm durante el evento de lluvia y en el segundo, 80 mm aproximadamente. Esto indicó la importancia de la lluvia del día en el desencadenamiento del evento torrencial.

Por su parte, en la Figura 3-8 (b) y (d), se evidenció mayor relevancia de la lluvia acumulada antecedente al evento torrencial, puesto que la intensidad de precipitación del día del evento no tuvo un papel fundamental en el aumento de la precipitación acumulada, sino que ésta ya estaba sobre los 120 mm cuatro días antes del evento.

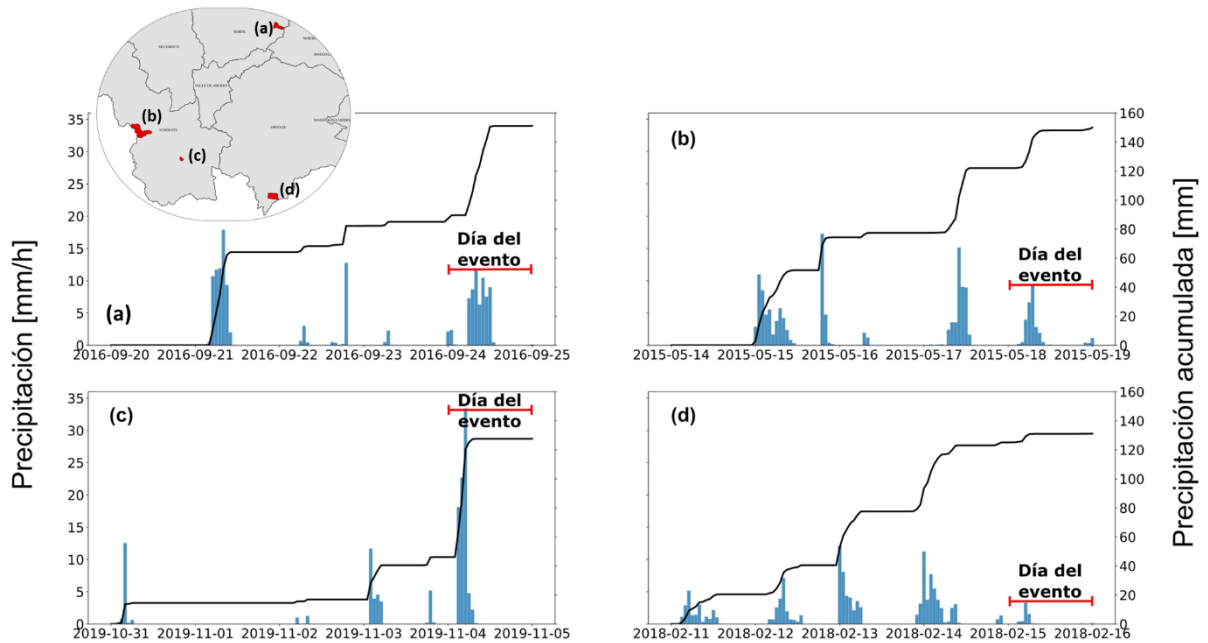


Figura 3-8: Condiciones de precipitación del día del evento y precipitación acumulada antecedente en cuatro cuencas analizadas. En (a) y (c) tuvo mayor relevancia la precipitación del día del evento y en (b) y (d), fue más importante la lluvia acumulada antes del evento.

En congruencia con lo anterior, se analizó el registro histórico de precipitación de los cuatro casos particulares. La Figura 3-9 (a) y (c) evidenció que, durante todo el registro de precipitación de ambas cuencas, el evento torrencial reportado correspondió a una intensidad de lluvia diaria atípica para la cuenca, con valores mayores a la media del periodo de registro.

La Figura 3-9 (b) y (d), corresponde a cuencas donde la lluvia asociada al día del evento torrencial fue similar a otros días de lluvia, por lo que en estos casos, se dedujo que la lluvia acumulada antecedente tuvo gran importancia en el desencadenamiento del evento torrencial.

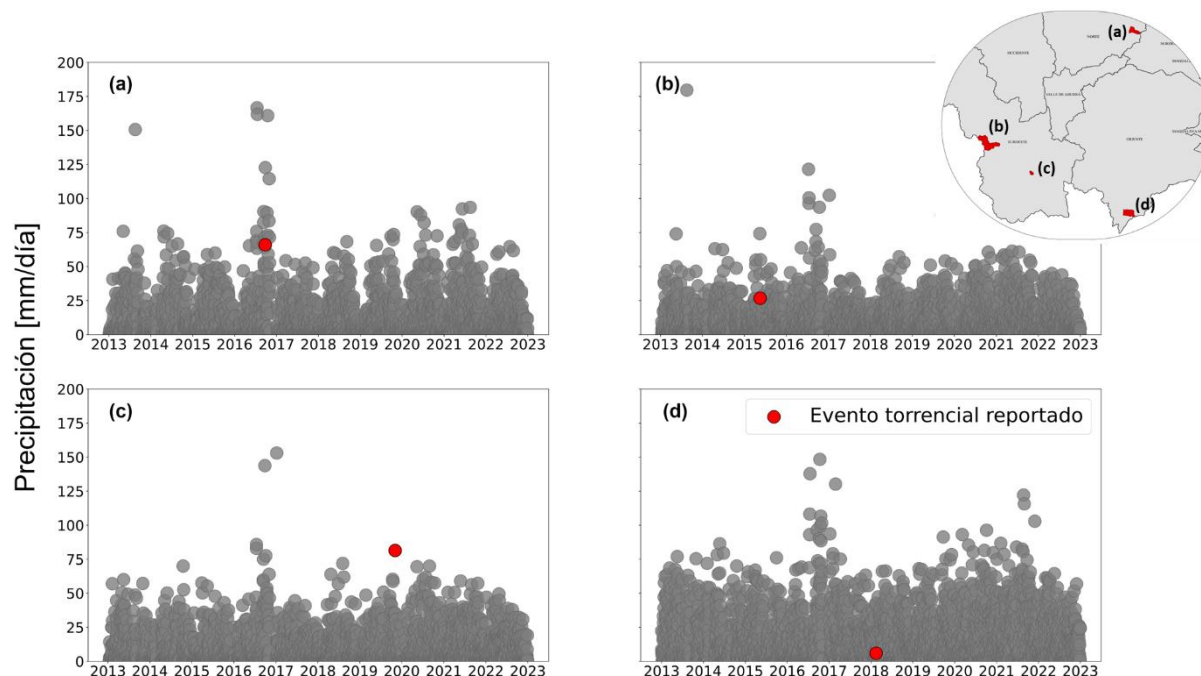


Figura 3-9: Eventos de lluvia presentados en las cuencas durante el tiempo de registro en mm/día. En rojo se marca el evento de lluvia que generó el evento torrencial reportado para cada cuenca.

Ambos comportamientos pueden estar relacionados con las características del suelo en las cuencas. Según Aristizábal et al. (2017); Aristizábal et al. (2022), la textura del suelo y en consecuencia, la permeabilidad o conductividad hidráulica saturada son factores determinantes en la influencia de la lluvia antecedente ante la ocurrencia de eventos detonados por lluvia. Suelos con texturas granulares (altas permeabilidades), se ven más afectados ante eventos de precipitación intensa, mientras que, en suelos con texturas arcillosas, tienen mayor relevancia las lluvias antecedentes.

3.4.3 Análisis espacial distribuido de la precipitación en cuencas torrenciales

La estructura y variabilidad espacial de la precipitación es uno de los principales factores que controlan la generación de eventos torrenciales (Douinot et al., 2016; Le Lay &

Saulnier, 2007). El movimiento de la tormenta, su dirección y velocidad tiene implicaciones en la respuesta hidrológica de la cuenca (Amengual et al., 2021; Ruiz-Villanueva et al., 2012; Zoccatelli et al., 2011).

En varios estudios se ha analizado la variabilidad espacial de la lluvia en casos particulares donde se han presentado eventos torrenciales (Douinot et al., 2016; Hoyos, Ceballos, Pérez-Carrasquilla, Sepúlveda, López-Zapata, Zuluaga, Velásquez, Herrera-Mejía, et al., 2019; Zoccatelli et al., 2013). Estos estudios tratan de brindar un mejor entendimiento de los fenómenos asociados al desencadenamiento de este tipo de eventos a partir de casos puntuales, sin embargo, limita la posibilidad de hacer generalizaciones sobre el tema en diferentes escenarios (Saharia et al., 2021).

En esta sección se analizó el comportamiento de la precipitación de manera espacial en las cuencas donde se tenía reporte de eventos torrenciales sucedidos en el periodo 2013-2022. Dichas cuencas se analizaron de manera conjunta buscando hacer inferencias generales sobre la distribución espacial de la lluvia durante un evento torrencial. Se contó con los datos de precipitación estimada según la metodología propuesta por Sepúlveda Berrío (2015) a partir de los registros del radar meteorológico operado por SIATA.

El análisis se desarrolló con una serie de limitaciones debido a la falta de precisión en la ubicación de los eventos torrenciales reportados en las bases de datos utilizadas para este trabajo. En este sentido, no hay certeza total de que todas las cuencas trazadas corresponden a la cuenca en donde se presentó el evento de lluvia que desencadenó el evento torrencial. En contraste, para esta sección, algunas cuencas se denominaron “cuencas de referencia”, ya que se tiene claridad sobre la cuenca exacta del evento torrencial.

Del mismo modo, algunas de las cuencas trazadas tienen áreas menores a 20 km². Si bien éstas pueden corresponder a la cuenca donde se presentó el evento torrencial, el campo de lluvia pudo concentrarse en un área mayor a la de la cuenca del evento, o en caso contrario, pudo cubrirla completamente, por lo que el análisis distribuido en este tipo de casos no tiene implicaciones en cuanto a la variabilidad espacial de la lluvia.

Por último, para los análisis de precipitación distribuida se tomó la lluvia acumulada del día que se reportó el evento torrencial en las bases de datos. No se tuvo información precisa sobre la hora del evento torrencial y se pudieron haber presentado eventos de lluvia anteriores (por ejemplo, en la noche del día anterior al reporte), que tendrían relación con el desencadenamiento del evento torrencial, sin embargo, no se tuvieron en cuenta para este análisis.

Los impactos de la variabilidad espacial de la lluvia durante un evento son importantes en tanto haya una interacción con otras variables geomorfológicas que también estén distribuidas en el espacio (Douinot et al., 2016). Cuando la lluvia cae en lugares de la cuenca con condiciones geomorfológicas particulares se genera una interacción entre ambas variables y los efectos en términos de respuesta hidrológica, pueden ser determinantes.

En esta sección se analizó para todas las cuencas torrenciales la relación entre características topográficas (altura en msnm, pendiente en %, HAND en m, rDUNE y TWI) y la precipitación del día del evento (ver Figura 3-10). Para esto, se partió de la información de cada variable de forma distribuida (pixel a pixel).

Con el fin de analizar todas las cuencas en su conjunto, se determinó el percentil 95 de cada variable para cada cuenca, tomando todos los píxeles como muestra. Con esto, se querían capturar los valores por debajo de los cuales se encuentran el 95% de los datos para cada variable analizada en las cuencas de estudio.

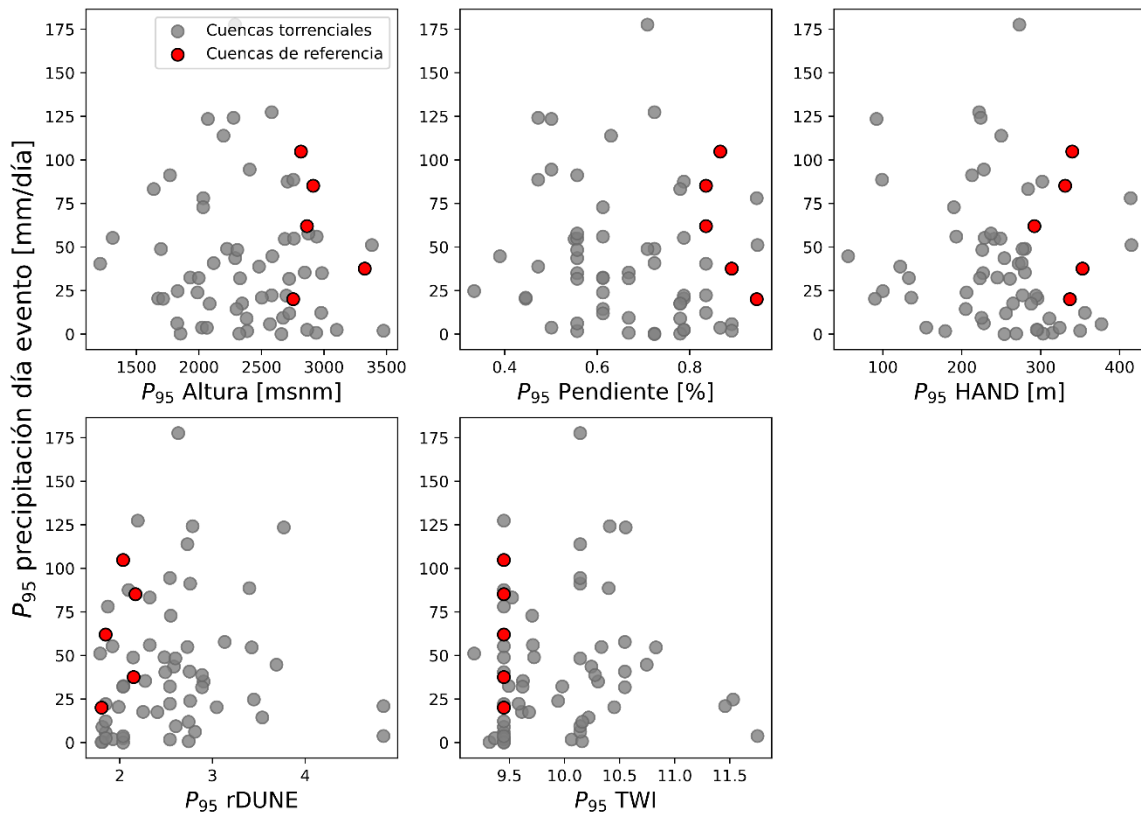


Figura 3-10: Relación entre percentil 95 de características geomorfológicas de las cuencas (Altura en msnm, pendiente en %, HAND en m, rDUNE y TWI) y el percentil 95 de la precipitación el día del evento torrencial.

Se tomaron cinco cuencas de referencia para las dispersiones presentadas. Estas cuencas corresponden a casos de avenidas torrenciales ampliamente conocidos en reportes de prensa o estudiados en otras investigaciones (Hoyos, Ceballos, Pérez-Carrasquilla, Sepúlveda, López-Zapata, Zuluaga, Velásquez, Herrera-Mejía, et al., 2019; Pérez-Hincapié, 2019; Pérez-Hincapié et al., 2010; Velásquez et al., 2020).

Las cuencas de referencia mostraron que las lluvias más altas durante el día del evento torrencial se dieron en las mayores alturas, pendientes y valores de HAND y en los menores valores de rDUNE y TWI, en congruencia con la relación directa e inversa respectivamente que tienen dichas variables con la torrencialidad.

Con esto se logró evidenciar que la lluvia estuvo concentrada en lugares de la cuenca donde las condiciones geomorfológicas pudieron favorecer la generación del evento torrencial.

En este caso, el comportamiento de las dispersiones no fue homogéneo ni mostró una tendencia clara para todas las cuencas analizadas, debido a las limitaciones con las que se contó en este análisis, mencionadas anteriormente.

El comportamiento espacial distribuido en dos cuencas torrenciales de referencia se muestra en la Figura 3-11. Los dos casos, conocidos por sus impactos significativos a la población y la infraestructura, corresponden a la avenida torrencial ocurrida en el municipio de Salgar Antioquia, en el año 2015 (a) y a la ocurrida en el corregimiento de Puerto Venus, municipio de Nariño, Antioquia en el 2018 (b) (Carvajal, 2018; Rivera, 2015).

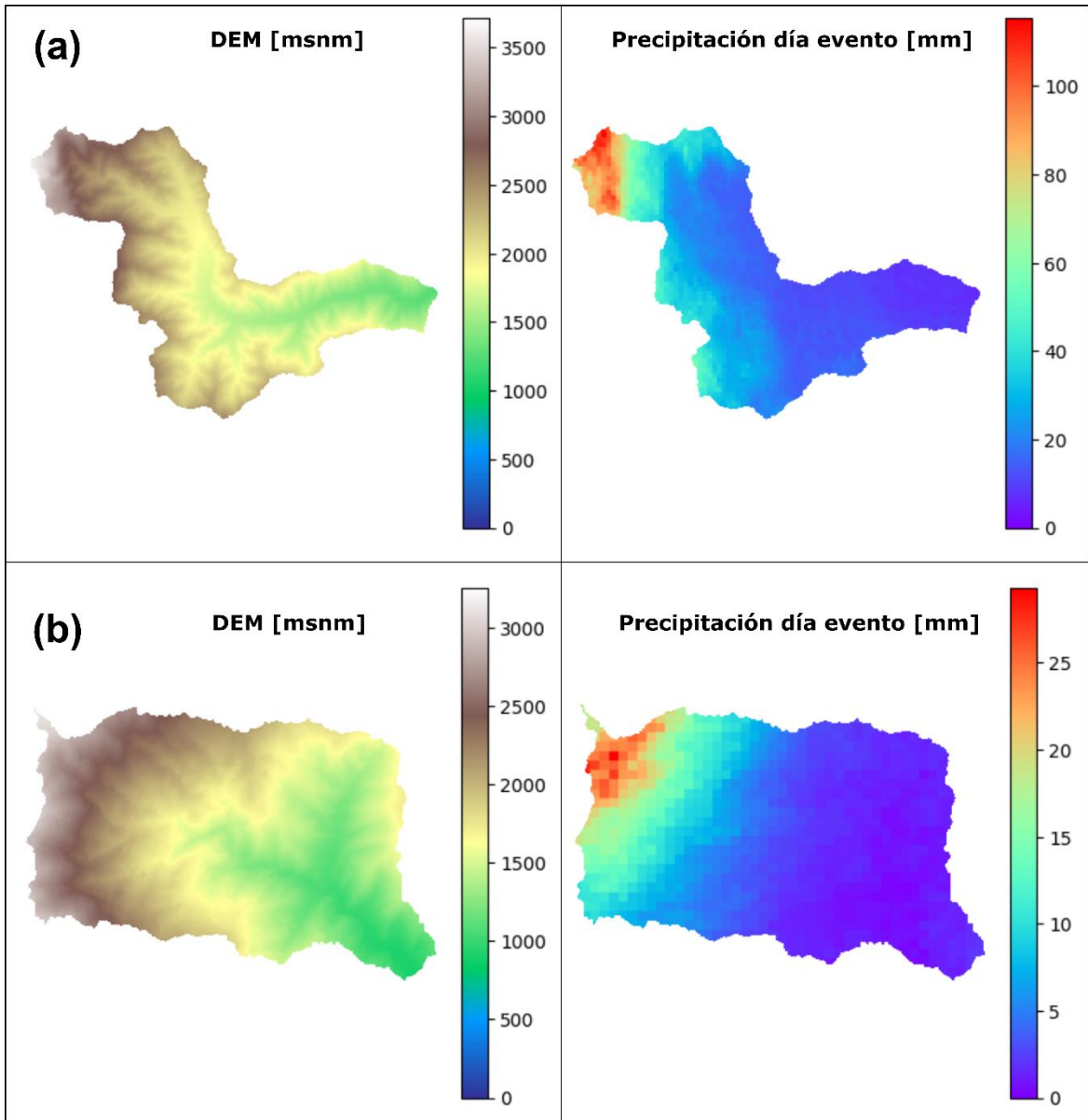


Figura 3-11: Modelo de elevación digital (DEM) y distribución espacial de la precipitación el día de los eventos torrenciales en dos cuencas de referencia: (a) cuenca de la quebrada La Liboriana, Salgar y (b) cuenca de la quebrada El Piñal, corregimiento de Puerto Venus, Nariño.

En ambos casos la precipitación del día del evento se localizó en la parte alta de las cuencas. En estas zonas, se tienen las mayores pendientes y las condiciones geomorfológicas son más propicias para el desencadenamiento de eventos torrenciales.

En otros estudios se ha encontrado que el comportamiento espacial de los eventos de precipitación que desencadenan avenidas torrenciales está fuertemente asociado a la orografía. En Al & Elson, (2005); Saharia et al. (2021); Velásquez et al. (2020); Zoccatelli et al. (2013), la mayor precipitación acumulada de los eventos torrenciales estudiados se localizó en la parte alta de la cuenca.

En los casos donde se estudia el comportamiento de la precipitación en eventos torrenciales puntuales, además del análisis espacial, es importante también estudiar el comportamiento de la tormenta a lo largo del tiempo. Para esto, generalmente se hacen análisis con información de radar, que suele tener mejor resolución temporal. Esto ayuda a conocer la escala de tiempo en que se presentan los eventos torrenciales, así como el movimiento de la tormenta en cada paso de tiempo.

La información detallada espacial y temporal de un evento torrencial ayuda a mejorar las simulaciones hidrológicas para determinar los caudales máximos que se pueden presentar durante un evento extremo, lo cual podría aportar a la gestión del riesgo en el departamento.

Lo anterior constituye un gran reto en el territorio, ya que llevarlo a cabo, requiere mejoras desde la toma de información del evento para las bases de datos, hasta la toma de información post-evento para conocer y validar las modelaciones de estimación de picos de esorrentía. Además, implica tener información detallada en cuencas que generalmente no están instrumentadas debido a su localización en zonas rurales.

En este sentido, recursos como radares meteorológicos o información satelital, útiles para representar la distribución espacio temporal de la precipitación, son fundamentales para la recolección de información detallada en cuencas hidrográficas no instrumentadas, lo cual, desde el punto de vista de la gestión del riesgo, podría mejorar los procesos de alertas tempranas y prevención de desastres.

Por otro lado, varios autores han relacionado la ocurrencia de eventos torrenciales con eventos de precipitación convectiva (Llasat et al., 2016; Rigo, 2008; Velásquez, 2022). En las zonas tropicales, específicamente en áreas de Centro y Sur América, son frecuentes

los sistemas convectivos mesoescalares (SCM) y gran proporción de la lluvia de la región se debe a este tipo de sistemas (Jaramillo et al., 2017).

Con el fin de analizar la influencia de la lluvia convectiva en los eventos torrenciales reportados en Antioquia tomados para este estudio, se determinó el porcentaje de área de cada cuenca cubierto por precipitación convectiva durante el día del evento. A partir de la función de densidad de probabilidad (FDP), se mostró la distribución de los datos para el conjunto de cuencas analizadas (ver Figura 3-12).

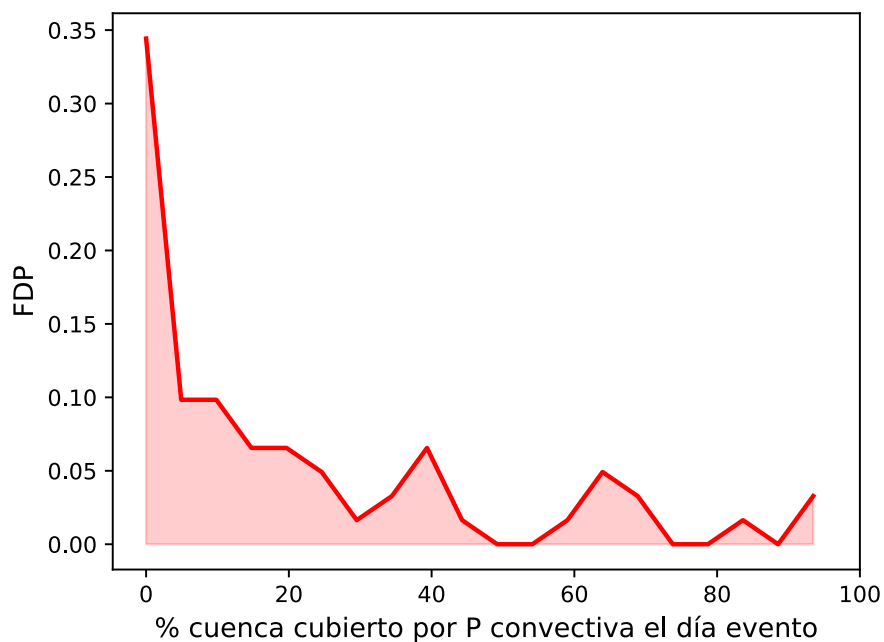


Figura 3-12: Función de densidad de probabilidad del porcentaje de la cuenca cubierto por precipitación convectiva el día del evento torrencial.

Los resultados mostraron que algunas cuencas fueron cubiertas en más de un 80% por el sistema convectivo asociado al evento de lluvia que generó el flujo torrencial. Los sistemas convectivos de mesoescala pueden llegar a cubrir áreas de hasta 600 km² (Bedoya-Soto et al., 2019). Sin embargo, la caracterización de sistemas convectivos tropicales realizada por Velásquez (2022), mostró que los sistemas convectivos en esa zona tienen áreas que oscilan entre 0.01 y 80 km², con el 80% de los datos por debajo de 9 km². Las cuencas del

presente estudio tienen áreas pequeñas, entre 2 y 200 km², por lo que algunas de ellas pudieron verse inmersas en un sistema convectivo.

En la mayoría de las cuencas, el porcentaje de área cubierta por el sistema convectivo fue menor a 20%, aunque alrededor del 10% de ellas, fueron cubiertas entre el 30% y 70% de su área. En este caso, las limitaciones que se tuvieron con respecto a las cuencas definidas para el análisis pueden explicar los porcentajes más bajos en el histograma.

En este estudio no se llegó a un análisis puntual cuenca por cuenca del comportamiento de los sistemas convectivos asociados a los eventos torrenciales. Sin embargo, es importante que antes de un análisis de ese tipo, se mejore la recolección de información en las bases de datos de reporte de eventos, con el fin de tener mayor rigurosidad y precisión en cuanto a la ubicación.

Por otro lado, en la Figura 3-13 se relacionó el porcentaje de lluvia convectiva con respecto a la precipitación total del día del evento torrencial, para todas las cuencas. Según Rigo (2008), la precipitación convectiva se caracteriza por presentar intensidades altas. En este estudio, en general, se logró observar una tendencia en aumento, donde precipitaciones totales más altas, tuvieron mayor porcentaje de lluvia convectiva.

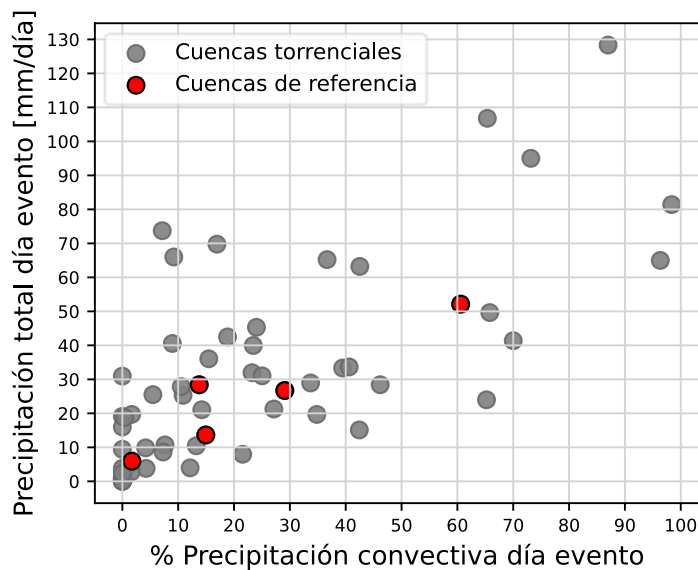


Figura 3-13: Porcentaje de precipitación convectiva y precipitación total del día del evento torrencial en cuencas con reporte.

Se presentaron casos donde la lluvia total del día del evento torrencial fue convectiva casi en su totalidad. De acuerdo con Llasat et al. (2021), los eventos de precipitación que tienen mayor porcentaje de precipitación convectiva están fuertemente asociados con los flujos torrenciales locales, lo que refuerza los resultados obtenidos.

En otros casos, donde se tuvo precipitación total alta (mayor a 60 mm), el porcentaje de lluvia convectiva fue menor a 10%. En estos casos valdría la pena realizar un análisis más particular, validando inicialmente la cuenca definida. Para las cuencas de referencia, se observó una tendencia marcada, donde los valores de precipitación total más altos tuvieron mayor porcentaje de lluvia convectiva.

En este estudio, dadas las limitaciones relacionadas con el desconocimiento de la hora de los eventos torrenciales reportados, se analizó solamente la precipitación del día de ocurrencia del evento. Sin embargo, vale la pena realizar estudios más detallados sobre el comportamiento temporal de la lluvia, donde se analice, por ejemplo, la generación de sistemas convectivos uno o varios días antes del evento torrencial, así como la duración de éstos, lo cual, con información detallada de fuentes como radares meteorológicos, se podría lograr y sería un gran aporte al entendimiento del tema.

En este sentido, Hoyos, Ceballos, Pérez-Carrasquilla, Sepulveda, et al. (2019) lograron analizar en el caso particular de la avenida torrencial en la cuenca La Liboriana, Salgar, Antioquia, el comportamiento temporal de tres eventos de precipitación antes del evento torrencial, donde la precipitación convectiva fue protagonista.

3.5 Conclusiones

Se analizó la precipitación de forma agregada en cuencas torrenciales y con comportamiento desconocido en el departamento de Antioquia. Con la precipitación estimada en cada cuenca a partir del radar meteorológico operado por SIATA, se definieron indicadores de precipitación para cada una con el fin de caracterizar el comportamiento horario, diario, acumulado y convectivo. Los resultados mostraron similitudes entre ambos

grupos de cuencas a partir de las funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada.

El análisis de importancia obtuvo mejor desempeño con la metodología Divergencia de Jensen Shannon y mostró que los indicadores de precipitación más importantes para la clasificación de cuencas fueron: cantidad de días con lluvia convectiva, percentil 95 de precipitación máxima horaria en un día, cantidad de horas con $P > 10\text{mm/h}$, precipitación promedio acumulada en 90 días y cantidad máxima de días consecutivos con lluvia.

En promedio, las variables geomorfológicas, morfométricas y de suelo tuvieron mayor importancia que los indicadores de lluvia. Sin embargo, se evidenció que la clasificación de cuencas mejoró cuando se incluyeron los indicadores de precipitación en las metodologías utilizadas ya que los porcentajes de error disminuyeron con respecto a los obtenidos solo a partir de variables geomorfológicas. El análisis en conjunto de variables geomorfológicas y de precipitación es fundamental para el entendimiento de fenómenos de carácter torrencial en el territorio de Antioquia y aporta a la clasificación de cuencas, lo cual se convierte en una herramienta para la gestión del riesgo.

El análisis agregado de la precipitación antecedente a los eventos torrenciales en las cuencas de estudio mostró que los 10 días anteriores al evento torrencial son importantes para el desencadenamiento de este, ya que son los días en los que se aumenta el acumulado de lluvia a mayor tasa. Por otro lado, las correlaciones entre la precipitación del día del evento y la precipitación acumulada antecedente hasta de 30 días, mostraron mejores resultados a partir del día 17 antes del evento, con lo que la definición de umbrales debería hacerse a partir de ese día.

Se encontraron dos patrones característicos en las cuencas torrenciales analizadas. En uno, la precipitación del día del evento fue más relevante, ya que incrementó abruptamente la precipitación acumulada. En el otro, la precipitación antecedente jugó un papel fundamental en el evento torrencial, ya que la precipitación del día del evento fue típica, sin embargo, ya se tenían acumulados de lluvia altos, por lo que se desencadenó el evento.

Con respecto al análisis espacial distribuido de la precipitación durante eventos torrenciales en el departamento, se encontró que los mayores valores de lluvia durante el

día del evento se localizaron en los sitios de la cuenca con características geomorfológicas que favorecieron la generación del flujo torrencial. La interacción de ambas variables probablemente hizo que se generara el evento. En cuencas de referencia, la precipitación se concentró en las partes altas de las cuencas, donde se tienen las mayores pendientes y los valores más altos del índice geomorfológico HAND, así como los menores valores de los índices rDUNE y TWI, en congruencia con la relación inversa que éstos últimos tienen con la torrencialidad.

Por otro lado, el porcentaje de las cuencas cubierto por precipitación convectiva durante el día del evento fue variable, aunque la mayoría de las cuencas se concentraron en valores de 0% a 30%. El porcentaje de precipitación convectiva fue mayor en eventos con intensidades de lluvia más altas. En este punto es importante realizar análisis más detallados y particulares de las cuencas de estudio para obtener inferencias más precisas sobre la relación de la precipitación convectiva con los eventos torrenciales en las cuencas analizadas.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

En este trabajo se evaluaron las características geomorfológicas y de precipitación en cuencas torrenciales del departamento de Antioquia. A partir de las bases de datos con reporte de eventos históricos, se definieron las cuencas torrenciales de estudio. Se utilizaron modelos de elevación digital de la misión ALOS PALSAR y los datos de precipitación estimada del radar meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).

Las variables geomorfológicas y morfométricas de mayor importancia para el estudio de eventos torrenciales en el departamento de Antioquia son las relacionadas con el relieve como índice topográfico de humedad, índice de Melton, pendiente del cauce principal, relieve, relación de relieve y número de rugosidad.

Por su parte, los indicadores de lluvia propuestos en este estudio, que mayor importancia presentaron fueron: cantidad de días con lluvia convectiva, percentil 95 de precipitación máxima horaria en un día, cantidad de horas con $P > 10 \text{ mm/h}$, precipitación promedio acumulada en 90 días y cantidad máxima de días consecutivos con lluvia.

En promedio, las variables geomorfológicas tuvieron mayor importancia que los indicadores de precipitación propuestos. En general, se encontró esta misma tendencia en otros estudios realizados sobre el tema. Esto pone en evidencia que la geomorfología juega un papel fundamental en el desencadenamiento de eventos torrenciales, por lo menos en cuencas de Antioquia donde tiene cobertura el radar meteorológico del AMVA.

Con las metodologías propuestas en este trabajo, fue posible clasificar cuencas con comportamiento desconocido a partir de la evaluación de variables geomorfológicas, obteniendo un porcentaje de error entre el 10% y 15%. Además, al incluir los indicadores de precipitación, se mejoró el porcentaje de error en la clasificación de las cuencas, con valores menores a 10%, lo que resalta la importancia de analizar los fenómenos torrenciales desde la geomorfología y la lluvia en conjunto.

El análisis agregado de la precipitación antecedente a eventos torrenciales en Antioquia mostró que los 10 días anteriores al evento torrencial son los más importantes para su desencadenamiento. En las cuencas de estudio, se determinó que a partir de los 17 días antecedentes al evento es posible definir umbrales críticos de precipitación.

Se encontraron dos patrones de precipitación característicos de desencadenamiento de eventos torrenciales. Uno en el que la precipitación del día del evento fue atípica para la cuenca y tuvo mayor relevancia que la precipitación acumulada y el otro donde la precipitación acumulada antecedente al evento fue más importante, puesto que la lluvia detonante tuvo valores normales la cuenca.

El análisis espacial distribuido de la precipitación mostró que la lluvia del día del evento se localizó en las partes altas de las cuencas. En estas zonas se tienen características geomorfológicas propicias para el desencadenamiento de eventos torrenciales como altas pendientes, altos valores del índice HAND, y bajos valores de los índices rDUNE y TWI. La interacción de ambos factores (lluvia y geomorfología) fue fundamental para causar los eventos.

Esta investigación es significativa para mejorar la prevención y gestión del riesgo de desastres en el departamento de Antioquia. Con los resultados de este trabajo se identificaron los factores geomorfológicos y de lluvia más importantes para el estudio de la torrencialidad en la región. Además, se lograron implementar metodologías para la clasificación de cuencas hidrográficas que pueden ser propensas a presentar eventos torrenciales dadas sus características geomorfológicas y de lluvia. Así mismo, se hicieron inferencias generalizadas sobre el comportamiento de la precipitación antes y durante los eventos torrenciales, lo cual puede conllevar a mejorar la predicción. La información

utilizada es práctica y está disponible para replicar y mejorar lo presentado en este trabajo, con el fin de extender los resultados de la clasificación de cuencas torrenciales.

4.2 Limitaciones, recomendaciones y trabajo futuro

Este trabajo parte de los reportes históricos de eventos torrenciales sucedidos en los últimos 10 años en el departamento de Antioquia. La falta de precisión en la ubicación de los eventos fue la principal limitante para el desarrollo de la investigación, puesto que no se pudieron trazar todas las cuencas hidrográficas asociadas a los eventos y en algunos casos, no se tuvo certeza de que el evento de lluvia que desencadenó el flujo torrencial estuviera ubicado en la cuenca trazada, lo que dificultó principalmente el análisis espacial distribuido de la precipitación.

La principal recomendación de este trabajo se centra en mejorar la recolección de información asociada al reporte de los eventos torrenciales en el territorio. Es primordial que se tenga mayor precisión en la ubicación del evento. Así mismo, es importante que se empiece a generar conocimiento post-evento, ya que la información recolectada después del evento puede ser de utilidad para mejorar procesos de modelación hidrológica e hidráulica, lo que aportaría en gran medida a la gestión del riesgo de desastres.

Partiendo de una ubicación más precisa de los eventos torrenciales, se pueden realizar análisis más profundos y detallados sobre la distribución espacial de la lluvia y los sistemas convectivos asociados a los flujos torrenciales.

De igual manera, el reporte de la hora del evento torrencial sería un gran aporte al mejoramiento del análisis de la precipitación, además se podría aprovechar la resolución temporal detallada de los datos del radar meteorológico del AMVA en la región.

La magnitud de los eventos podría ser una variable importante en el reporte de información post-evento. Si bien las bases de datos reportan cantidad de personas e infraestructura afectada, se podría hacer investigación enfocada en dar una medida de magnitud que pueda ser aplicada por los organismos de gestión del riesgo responsables de los reportes

y que esto a su vez, sea el punto de partida para más investigaciones asociadas a las variables geomorfológicas y de precipitación relacionadas con la magnitud de los eventos torrenciales.

La inclusión de una mayor cantidad de cuencas hidrográficas torrenciales y aleatorias del territorio podría robustecer los análisis realizados en este trabajo, teniendo en cuenta que, según los resultados mostrados, el hecho de tener mayor muestra de cuencas torrenciales conocidas disminuye los porcentajes de error en las metodologías propuestas de clasificación de cuencas. Así mismo, se pueden usar enfoques de machine learning tomando las variables geomorfológicas y pluviales analizadas para definir el grado de importancia y clasificar las cuencas torrenciales, lo cual se podría comparar con los resultados obtenidos en este estudio.

Finalmente, se pueden proponer otros indicadores de lluvia en las cuencas, que respondan a la distribución de las características geomorfológicas, es decir, definir la lluvia condicionada a los píxeles de las cuencas donde se tienen condiciones topográficas específicas. Este análisis sería valioso en términos de relacionar los patrones de lluvia con los geomorfológicos en la respuesta hidrológica de las cuencas.

Bibliografía

- Abdelkader, M. M., Al-Amoud, A. I., El Alfy, M., El-Feky, A., & Saber, M. (2021). Assessment of flash flood hazard based on morphometric aspects and rainfall-runoff modeling in Wadi Nisah, central Saudi Arabia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23(May), 100562. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100562>
- Adnan, M. S. G., Dewan, A., Zannat, K. E., & Abdullah, A. Y. M. (2019). The use of watershed geomorphic data in flash flood susceptibility zoning: a case study of the Karnaphuli and Sangu river basins of Bangladesh. *Natural Hazards*, 99(1), 425–448. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03749-3>
- Al, S. E. T., & Elson, P. E. A. N. (2005). Extraordinary flood response of a small urban watershed. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(12), 1730–1732. <https://doi.org/10.1175/JHM426.1>
- Alam, A., Ahmed, B., & Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, 575–576(May 2020), 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.047>
- Al-Saif, H. (2010). Assessing flood vulnerability of Wadi Hanifa basin and surrounding area, central Saudi Arabia. *Journal of Environmental Hydrology*, 18, 1–12. <http://www.hydroweb.com>
- Amengual, A., Borga, M., Ravazzani, G., & Crema, S. (2021). The Role of Storm Movement in Controlling Flash Flood Response: An Analysis of the 28 September 2012 Extreme Event in Murcia, Southeastern Spain. *Journal of Hydrometeorology*, 22(9), 2379–2392. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0001.1>
- Arango, M. I., Aristizábal, E., & Gómez, F. (2021). Morphometrical analysis of torrential flows-prone catchments in tropical and mountainous terrain of the Colombian Andes by machine learning techniques. *Natural Hazards*, 105(1), 983–1012. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04346-5>
- Arias, L. A. (2011). Estructura, Clasificación y Evolución del relieve en el departamento de Antioquia. In R. Callejas & Á. Idárraga (Eds.), *FLORA DE ANTIOQUIA*

CATÁLOGO DE LAS PLANTAS VASCULARES VOLUMEN I (pp. 27–179).
Universidad de Antioquia.

- Aristizábal, E., Gamboa, M. F., & Javier Leoz, F. (2010). SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA INDUCIDOS POR LLUVIA PARA EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA. In *Revista EIA*.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J., Vélez, J., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Analysis of empirical rainfall thresholds for the prognosis of landslides in the Aburrá Valley, Colombia. *Revista EIA*, 8(15), 95–111.
- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias*, 34(53), 209–227.
- Aristizábal, E., Riaño, F., & Jiménez-Ortiz, J. (2022). Rainfall thresholds as triggering factor in the Central cordillera of the Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 44(2), 183–197. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022009>
- Aristizábal, E., Vélez, J. I., Martínez, H. E., & Jaboyedoff, M. (2016). SHIA_Landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins. *Landslides*, 13(3), 497–517. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0580-7>
- Aristizábal, E., Vélez Upegui, J. I., & Martínez Carvajal, H. E. (2017). Influencia De La Lluvia Antecedente Y La Conductividad Hidráulica En La Ocurrencia De Deslizamientos Detonados Por Lluvias Utilizando El Modelo Shia_Landslide. *Revista EIA*, 13(26), 31–46. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.863>
- Aronica, G. T., Brigandí, G., & Morey, N. (2012). Flash floods and debris flow in the city area of Messina, north-east part of Sicily, Italy in October 2009: The case of the Giampilieri catchment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(5), 1295–1309. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1295-2012>
- Ávila, A. D., Carvajal, Y. E., & Justino, F. (2015). Representative rainfall thresholds for flash floods, Colombia Representative rainfall thresholds for flash floods in the Cali river watershed, Colombia Representative rainfall thresholds for flash floods, Colombia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 3, 4095–4119. <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-4095-2015>
- Babajaa, S., Masoud, M., & Al-Amri, N. (2014). Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6), 2469–2481. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0941-2>

- Bedoya-Soto, J. M., Aristizábal, E., Carmona, A. M., & Poveda, G. (2019). Seasonal shift of the diurnal cycle of rainfall over medellin's valley, central andes of Colombia (1998–2005). *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00092>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bezák, N., Šraj, M., & Mikoš, M. (2016). Copula-based IDF curves and empirical rainfall thresholds for flash floods and rainfall-induced landslides. *Journal of Hydrology*, 541, 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.058>
- Bhatt, S., & Ahmed, S. A. (2014). Morphometric analysis to determine floods in the Upper Krishna basin using Cartosat DEM. *Geocarto International*, 29(8), 878–894. <https://doi.org/10.1080/10106049.2013.868042>
- Borga, M., Anagnostou, E. N., Blöschl, G., & Creutin, J.-D. (2011). Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project. *Environmental Science and Policy*, 14(7). <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.017>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Caballero, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales, una amenaza natural en el Valle de Aburrá. *Revista Gestión y Ambiente*, 45–50.
- Cabral, V., Reis, F., Veloso, V., Ogura, A., & Zarfl, C. (2023). A multi-step hazard assessment for debris-flow prone areas influenced by hydroclimatic events. *Engineering Geology*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106961>
- Carvajal, E. (2018). 12 casas arrasadas y 50 evacuadas por avalancha en Puerto Venus. *El Colombiano*.
- Castillo, V. M., Gómez-Plaza, A., & Martínez-Mena, M. (2003). The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A simulation approach. *Journal of Hydrology*, 284(1–4), 114–130. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00264-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00264-6)
- Chen, C. 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>
- Chen, S., Zhu, S., Wen, X., Shao, H., He, C., Qi, J., Lv, L., Han, L., & Liu, S. (2023). Mapping Potential Soil Water Erosion and Flood Hazard Zones in the Yarlung

- Tsangpo River Basin, China. *Atmosphere*, 14(1).
<https://doi.org/10.3390/atmos14010049>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010-2011*.
- Costache, R., Pham, Q. B., Sharifi, E., Linh, N. T. T., Abba, S. I., Vojtek, M., Vojteková, J., Nhi, P. T. T., & Khoi, D. N. (2020). Flash-flood susceptibility assessment using multi-criteria decision making and machine learning supported by remote sensing and GIS techniques. *Remote Sensing*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/RS12010106>
- Coustau, M., Bouvier, C., Borrell-Estupina, V., & Jourde, H. (2012). Flood modelling with a distributed event-based parsimonious rainfall-runoff model: Case of the karstic Lez river catchment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(4), 1119–1133.
<https://doi.org/10.5194/nhess-12-1119-2012>
- Creutin, J. D., & Borga, M. (2003). Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard. *Hydrological Processes*, 17(7), 1453–1456. <https://doi.org/10.1002/hyp.5122>
- Creutin, J. D., Borga, M., Grunfest, E., Lutoff, C., Zoccatelli, D., & Ruin, I. (2013). A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *Journal of Hydrology*, 482, 14–24. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.11.009>
- DAGRAN. (2023). *Histórico de emergencias*.
<https://gobantioquia.maps.arcgis.com/apps/dashboards/63b454366f2a482697185d1e1fd7b5fa>
- DESINVENTAR. (2023). *Disaster Information Management System*.
<https://db.desinventar.org/>
- Dhote, P. R., Joshi, Y., Rajib, A., Thakur, P. K., Nikam, B. R., & Aggarwal, S. P. (2023). Evaluating Topography-based Approaches for Fast Floodplain Mapping in Data-scarce Complex-terrain Regions: Findings from a Himalayan Basin. *Journal of Hydrology*, 129309. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129309>
- Douinot, A., Roux, H., Garambois, P. A., Larnier, K., Labat, D., & Dartus, D. (2016). Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 541, 359–370. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.024>
- Ehlschlaeger, C. (1989). *Using the AT search algorithm to develop hydrologic models from digital elevation data*. <https://www.researchgate.net/publication/243781937>
- El-Fakharany, M. A., Hegazy, M. N., Mansour, N. M., & Abdo, A. M. (2021). Flash flood hazard assessment and prioritization of sub-watersheds in Heliopolis basin, East Cairo, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12517-021-07991-7>

- Farhan, Y., Anbar, A., Al-Shaikh, N., & Mousa, R. (2017). Prioritization of Semi-Arid Agricultural Watershed Using Morphometric and Principal Component Analysis, Remote Sensing, and GIS Techniques, the Zerqa River Watershed, Northern Jordan. *Agricultural Sciences*, 08(01), 113–148. <https://doi.org/10.4236/as.2017.81009>
- Farooq, H., Ahmad, S., Bhat, M. S., Ahmad, B., & Alam, A. (2019). Flood hazard assessment of upper Jhelum basin using morphometric parameters. *Environmental Earth Sciences*, 78(2), 0. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8046-1>
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., ... Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- Ghasemlounia, R., & Utlu, M. (2021). Flood prioritization of basins based on geomorphometric properties using principal component analysis, morphometric analysis and Redvan's priority methods: A case study of Harşit River basin. *Journal of Hydrology*, 603(PC), 127061. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127061>
- Gómez, D., Aristizábal, E., García, E. F., Marín, D., Valencia, S., & Vásquez, M. (2023). Landslides forecasting using satellite rainfall estimations and machine learning in the Colombian Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104293>
- Guerrero, L. A., & Aristizábal, E. (2019). Estimación y análisis de umbrales críticos de lluvia para la ocurrencia de avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá (Antioquia). *Revista EIA*, 16(32), 97–111. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1281>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, 5(1), 3–17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>
- Henao Salgado, M. J., & Zambrano Nájera, J. (2022). Assessing Flood Early Warning Systems for Flash Floods. In *Frontiers in Climate* (Vol. 4). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.787042>
- Hermelín, M. (2003). *El Paisaje Antioqueño: Otra perspectiva*.
- Hirschberg, J., Badoux, A., McArdell, B. W., Leonarduzzi, E., & Molnar, P. (2021). Evaluating methods for debris-flow prediction based on rainfall in an Alpine catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(9), 2773–2789. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2773-2021>

- Hjerdt, K. N. N., McDonnell, J. J. J., Seibert, J., & Rodhe, A. (2004). A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. *Water Resources Research*, 40(5). <https://doi.org/10.1029/2004WR003130>
- Hoyos, C. D., Ceballos, L. I., Pérez-Carrasquilla, J. S., Sepúlveda, J., López-Zapata, S. M., Zuluaga, M. D., Velásquez, N., Herrera-Mejía, L., Hernández, O., Guzmán-Echavarría, G., & others. (2019). Meteorological conditions leading to the 2015 Salgar flash flood: lessons for vulnerable regions in tropical complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2635–2665.
- Hoyos, C. D., Ceballos, L. I., Pérez-Carrasquilla, J. S., Sepúlveda, J., López-Zapata, S. M., Zuluaga, M. D., Velásquez, N., Herrera-Mejía, L., Hernández, O., Guzmán-Echavarría, G., & Zapata, M. (2019). Meteorological conditions leading to the 2015 Salgar flash flood: Lessons for vulnerable regions in tropical complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2635–2665. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2635-2019>
- Ilinca, V. (2021). Using morphometrics to distinguish between debris flow, debris flood and flood (Southern Carpathians, Romania). *Catena*, 197(February 2020), 104982. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104982>
- Jaramillo, L., Poveda, G., & Mejía, J. F. (2017). Mesoscale convective systems and other precipitation features over the tropical Americas and surrounding seas as seen by TRMM. *International Journal of Climatology*, 37, 380–397. <https://doi.org/10.1002/joc.5009>
- JAXA. (2015). *Dataset: ASF DAAC 2015, ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_hi_res; Includes Material © JAXA/METI 2023*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8866-2>
- Jonkman, S. N. (2005). Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods. *Natural Hazards*, 34, 151–175. <http://www.em-dat.net/>.
- Kallio, M., Virkki, V., Guillaume, J. H. A., & van Dijk, A. I. J. M. (2019). Downscaling runoff products using areal interpolation: a combined pycnophylactic-dasymeric method. *23rd International Congress on Modelling and Simulation*.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 6(10), 362.
- Le Lay, M., & Saulnier, G. M. (2007). Exploring the signature of climate and landscape spatial variabilities in flash flood events: Case of the 8-9 September 2002 Cévennes-Vivarais catastrophic event. *Geophysical Research Letters*, 34(13). <https://doi.org/10.1029/2007GL029746>

- Lin, J. (1991). Divergence Measures Based on the Shannon Entropy. *IEEE Transactions on Information Theory*, 37(1), 145–151. <https://doi.org/10.1109/18.61115>
- Lin, J. M., & Billa, L. (2021). Spatial Prediction of Flood-Prone Areas Using Geographically Weighted Regression. *Environmental Advances*, 6, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100118>
- Llasat, M. C., del Moral, A., Cortès, M., & Rigo, T. (2021). Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105581>
- Llasat, M. C., Marcos, R., Turco, M., Gilabert, J., & Llasat-Botija, M. (2016). Trends in flash flood events versus convective precipitation in the Mediterranean region: The case of Catalonia. *Journal of Hydrology*, 541, 24–37. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.040>
- López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>
- Loritz, R., Kleidon, A., Jackisch, C., Westhoff, M., Ehret, U., Gupta, H., & Zehe, E. (2019). A topographic index explaining hydrological similarity by accounting for the joint controls of runoff formation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(9), 3807–3821. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3807-2019>
- Lv, J., Qin, S., Chen, J., Qiao, S., Yao, J., Zhao, X., Cao, R., & Yin, J. (2023). Application of different watershed units to debris flow susceptibility mapping: A case study of Northeast China. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1118160>
- Ma, M., Wang, H., Yang, Y., Zhao, G., Tang, G., Hong, Z., Clark, R. A., Chen, Y., Xu, H., & Hong, Y. (2021). Development of a new rainfall-triggering index of flash flood warning-case study in Yunnan province, China. *Journal of Flood Risk Management*, 14(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12676>
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>

- Marchi, L., & Tecca, P. R. (1995). Cônes de dejection dans les alpes orientales italiennes: Morphométrie et processus d'accumulation. *Geodinamica Acta*, 8(1), 20–27. <https://doi.org/10.1080/09853111.1995.11105270>
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals Garrido, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, 5, 59–69. <http://revista.eia.edu.co/articulos5/art45.pdf>
- Nefeslioglu, H. A., Duman, T. Y., & Durmaz, S. (2008). Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*, 94(3–4), 401–418. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.036>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1–2), 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Momo, M. R., Severo, D. L., Pinheiro, A., & Nobre, C. A. (2016). HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 30(2), 320–333. <https://doi.org/10.1002/hyp.10581>
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., & Anquetin, S. (2008). Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 362(3–4), 274–290. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.023>
- Obeidat, M., Awawdeh, M., & Al-Hantouli, F. (2021). Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Easal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12711>
- Oh, C. H., Choo, K. S., Go, C. M., Choi, J. R., & Kim, B. S. (2021). Forecasting of debris flow using machine learning-based adjusted rainfall information and ramms model. *Water (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/w13172360>
- Patton, P. C., & Baker, V. R. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12(5), 941–952. <https://doi.org/10.1029/WR012i005p00941>
- Penna, D., Tromp-Van Meerveld, H. J., Gobbi, A., Borga, M., & Dalla Fontana, G. (2011). The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 689–702. <https://doi.org/10.5194/hess-15-689-2011>
- Pérez-Hincapié, A. M. (2019). *Zonificación de amenazas por avenidas torrenciales a partir del análisis geomorfológico de los depósitos asociados y el uso de isótopos*

- cosmogénicos. Caso de estudio: Cuencas de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental Colombiana, Andes del Norte.*
- Pérez-Hincapié, A. M., Ramírez, G., Geovany, O., Sanmiguel, B., & Paniagua-arroyave, J. F. (2010). *Comparative geomorphological analysis applied to the hazard assessment of debris flows : case study of three watersheds of the Western Cordillera of Colombia , Northern Andes . 1, 12.*
- Ponziani, M., Ponziani, D., Giorgi, A., Stevenin, H., & Ratto, S. M. (2023). The use of machine learning techniques for a predictive model of debris flows triggered by short intense rainfall. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05853-x>
- Poveda, G. (2006). El Clima de Antioquia. *Geografía de Antioquia, January 2006.*
- Pradhan, A. M. S., Lee, S. R., & Kim, Y. T. (2019). A shallow slide prediction model combining rainfall threshold warnings and shallow slide susceptibility in Busan, Korea. *Landslides, 16*(3), 647–659. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1112-z>
- Qing, F., Zhao, Y., Meng, X., Su, X., Qi, T., & Yue, D. (2020). Application of machine learning to debris flow susceptibility mapping along the China-Pakistan Karakoram Highway. *Remote Sensing, 12*(18). <https://doi.org/10.3390/RS12182933>
- Ragetti, S., Zhou, J., Wang, H., Liu, C., & Guo, L. (2017). Modeling flash floods in ungauged mountain catchments of China: A decision tree learning approach for parameter regionalization. *Journal of Hydrology, 555*, 330–346. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.031>
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment, 112*(9), 3469–3481. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Riazi, M., Khosravi, K., Shahedi, K., Ahmad, S., Jun, C., Bateni, S. M., & Kazakis, N. (2023). Enhancing flood susceptibility modeling using multi-temporal SAR images, CHIRPS data, and hybrid machine learning algorithms. *Science of the Total Environment, 871*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162066>
- Rigo, T. (2008). *Estudio de sistemas convectivos mesoscales en la zona mediterránea occidental mediante el uso del radar meteorológico.* Universidad de Barcelona.
- Rivera, D. (2015, May 18). El país sumido en la tristeza por el desastre de Salgar. *Revista Semana*. <https://www.semana.com/nacion/articulo/avalancha-en-salgar-deja-48-muertos-un-centenar-de-desaparecidos/428243-3>

- Rodríguez-Iturbe, I., & Valdés, J. B. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, 15(6), 1409–1420. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01409>
- Rozalis, S., Morin, E., Yair, Y., & Price, C. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.021>
- Ruiz-Villanueva, V., Borga, M., Zoccatelli, D., Marchi, L., Gaume, E., & Ehret, U. (2012). Extreme flood response to short-duration convective rainfall in South-West Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(5), 1543–1559. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1543-2012>
- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Bodoque, J. M., Ballesteros Cánovas, J. A., & Stoffel, M. (2013). Characterisation of flash floods in small ungauged mountain basins of Central Spain using an integrated approach. *Catena*, 110, 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.015>
- Saharia, M., Kirstetter, P.-E., Vergara, H., Gourley, J., Emmanuel, I., & Andrieu, H. (2021). On the Impact of Rainfall Spatial Variability, Geomorphology, and Climatology on Flash Floods. *Water Resources Research*.
- Santos, M., & Frago, M. (2016). Precipitation thresholds for triggering floods in the Corgo basin, Portugal. *Water (Switzerland)*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/w8090376>
- Saxton, K. E., Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. In *Landslides* (Vol. 15, Issue 8, pp. 1483–1501). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Sepúlveda Berrío, J. (2015). *Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de Radar Meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá* [Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/54581/>
- Sepúlveda-Berrío, J., & Hoyos, C. D. (2017). *Disdrometer-based C-Band Radar Quantitative Precipitation Estimation (QPE) in a highly complex terrain region in tropical Colombia*.
- Shivhare, V., Gupta, C., Mallick, J., & Singh, C. K. (2022). Geospatial modelling for sub-watershed prioritization in Western Himalayan Basin using morphometric parameters. *Natural Hazards*, 110(1), 545–561. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04957-6>

- SIATA. (2023). *SIATA Monitoreo*. https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/monitoreo
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Liang, X., Mcdonnell, J. J., Mendiondo, E. M., Connell, P. E. O., Oki, T., Pomeroy, J. W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., & Zehe, E. (2012). *IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003 – 2012 : Shaping an exciting future for the hydrological sciences IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003 – 2012 : Shaping an exciting future for the hydrological sciences*. 6667(June 2013), 2003–2012. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.857.51421>
- Sørensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1), 101–112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Steiner, M., Houze, R. A., & Yuter, S. E. (1995). Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gauge Data. In *Journal of Applied Meteorology* (Vol. 34, Issue 9, pp. 1978–2007). [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<1978:CCOTDS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<1978:CCOTDS>2.0.CO;2)
- Taha, M. M. N., Elbarbary, S. M., Naguib, D. M., & El-Shamy, I. Z. (2017). Flash flood hazard zonation based on basin morphometry using remote sensing and GIS techniques: A case study of Wadi Qena basin, Eastern Desert, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.007>
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309–319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Ullah, K., Wang, Y., Fang, Z., Wang, L., & Rahman, M. (2022). Multi-hazard susceptibility mapping based on Convolutional Neural Networks. *Geoscience Frontiers*, 13(5). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101425>
- Unnithan, S. L. K., Biswal, B., Sharples, W., Rüdiger, C., Bahramian, K., & Hou, J. (2023). Sensitivity Analysis of Modelled Flood Inundation Extents over Hawkesbury–Nepean Catchment. *Geosciences*, 13(3), 67. <https://doi.org/10.3390/geosciences13030067>
- Vannier, O., Braud, I., & Anquetin, S. (2014). Regional estimation of catchment-scale soil properties by means of streamflow recession analysis for use in distributed hydrological models. *Hydrological Processes*, 28(26), 6276–6291. <https://doi.org/10.1002/hyp.10101>
- Velásquez, N. (2022). Assessment of Deep Convective Systems in the Colombian Andean Region. *Hydrology*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/hydrology9070119>

- Velásquez, N., Hoyos, C., Vélez, J., & Zapata, E. (2020). Reconstructing the Salgar 2015 Flash Flood Using Radar Retrievals and a Conceptual Modeling Framework: A Basis for a Better Flood Generating Mechanisms Discrimination. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–36. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-452>
- Velásquez, N., Vélez, J. I., Álvarez-Villa, O. D., & Salamanca, S. P. (2023). Comprehensive Analysis of Hydrological Processes in a Programmable Environment: The Watershed Modeling Framework. *Hydrology*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/hydrology10040076>
- Welsh, A., & 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>
- Wu, W., Fan, Y., Wang, Z., & Liu, H. (2008). Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 126(3–4), 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.026>
- Xiong, K., Adhikari, B. R., Stamatopoulos, C. A., Zhan, Y., Wu, S., Dong, Z., & Di, B. (2020). Comparison of different machine learning methods for debris flow susceptibility mapping: A case study in the Sichuan Province, China. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020295>
- Yang, L., Smith, J., Baeck, M. L., & Morin, E. (2019). Flash flooding in arid/semiarid regions: Climatological analyses of flood-producing storms in central arizona during the North American monsoon. *Journal of Hydrometeorology*, 20(7), 1449–1471. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0016.1>
- Young, A., Bhattacharya, B., & Zevenbergen, C. (2021). A rainfall threshold-based approach to early warnings in urban data-scarce regions: A case study of pluvial flooding in Alexandria, Egypt. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12702>
- Youssef, A. M., Pradhan, B., & Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62(3). <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0551-1>
- Zhang, R., Chen, Y., Zhang, X., Ma, Q., & Ren, L. (2022). Mapping homogeneous regions for flash floods using machine learning: A case study in Jiangxi province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102717>
- Zhang, Y., Ge, T., Tian, W., & Liou, Y. A. (2019). Debris flow susceptibility mapping using machine-learning techniques in Shigatse area, China. *Remote Sensing*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/rs11232801>

- Zhao, Y., Meng, X., Qi, T., Chen, G., Li, Y., Yue, D., & Qing, F. (2021). Modeling the spatial distribution of debris flows and analysis of the controlling factors: A machine learning approach. *Remote Sensing*, *13*(23). <https://doi.org/10.3390/rs13234813>
- Zhao, Y., Meng, X., Qi, T., Chen, G., Li, Y., Yue, D., & Qing, F. (2022). Extracting more features from rainfall data to analyze the conditions triggering debris flows. *Landslides*, *19*(9), 2091–2099. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01893-9>
- Zhao, Y., Meng, X., Qi, T., Chen, G., Li, Y., Yue, D., & Qing, F. (2023). Estimating the daily rainfall thresholds of regional debris flows in the Bailong River Basin, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *82*(2). <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03068-9>
- Zoccatelli, D., Bernhofer, C., Janabi, F. al, Borga, M., Jatho, N., & Tarolli, M. (2013). Rainfall Space-Time Organization and Orographic Control on Flash Flood Response: The Weisseritz Event of August 13, 2002. *Journal of Hydrologic Engineering*, *18*(2), 183–193. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000569](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000569)
- Zoccatelli, D., Borga, M., Viglione, A., Chirico, G. B., & Blöschl, G. (2011). Spatial moments of catchment rainfall: Rainfall spatial organisation, basin morphology, and flood response. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(12), 3767–3783. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3767-2011>