

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-04-03

Artículos

**Análisis de eventos torrenciales en el Valle de Aburrá,
en los años 2010-2011 con la herramienta r.avaflow**
**Analysis of torrential events in the Aburrá Valley, in the
years 2010-2011 with the r.avaflow tool**

Tania Grisales-Ospina¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2648-6579>

Victor Hugo Aristizabal-Tique², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7880-5883>

Juan Daniel Ríos-Arboleda³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-9968>

¹Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia,
tania.grisales@campusucc.edu.co

²Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia,
victor.aristizabalt@campusucc.edu.co

³Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia,
juan.riosar@campusucc.edu.co

Autor para correspondencia: Juan Daniel Ríos-Arboleda,
juan.riosar@campusucc.edu.co

Resumen

En el presente trabajo se analizaron dos eventos torrenciales ocurridos en el Valle de Aburrá durante el periodo húmedo 2010-2011, donde se presentó una fuerte fase fría del fenómeno ENSO, en la cual las precipitaciones aumentaron de manera significativa en relación con los años anteriores y posteriores, detonando gran cantidad de movimientos en masa, y posteriores flujos de lodos y escombros en las quebradas El Cedro (Copacabana) y La Bermejala (La Estrella). Como producto del análisis hidrológico se obtuvieron las condiciones y umbrales necesarios para el desencadenamiento de los flujos de lodos y escombros. Por otro lado, se realizó la simulación o propagación del flujo con la herramienta r.avaflow; se concluyó que la longitud de propagación está asociada con las altas pendientes y se validó la capacidad de la herramienta para representar dichos fenómenos.

Palabras clave: Avenidas torrenciales, debris flows, mud flows, La Niña 2010-2011, Valle de Aburrá.

Abstract

In the present work, two (2) torrential events that occurred in the Valley of Aburrá during the wet period 2010-2011 are analyzed, where a strong cold phase of the ENSO occurred, in which rainfall increased significantly in relation to the previous and subsequent years, triggering a large number of mass movements and subsequent mud and debris flows in the El Cedro (Copacabana) and La Bermejala (La Estrella) streams. As a product of the hydrological analysis, the conditions and thresholds necessary for the triggering of mud and debris flows were obtained. On

the other hand, the simulation or propagation of the flow was carried out with the *r.avaflow* tool, concluding that the propagation length is associated with high slopes and validating the ability of the tool to represent these phenomena.

Keywords: Torrential floods, debris flows, mud flows, La Niña 2010-2011, Valley of Aburrá.

Recibido: 19/12/2022

Aceptado: 09/05/2024

Publicado *ahead of print*: 05/12/2024

Versión final: 01/07/2025

Introducción

Las avenidas torrenciales (*debris flow*) son un flujo compuesto por la mezcla de agua y sedimentos poco o nada consolidados, que transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas, típico de regiones montañosas (Acosta, 2012; Aristizábal, Arango, & García, 2020; García *et al.*, 2015; Medina, Hürlimann, & Bateman, 2008; Rickenmann, Laigle, McArdell, & Hübl, 2006; Tommaso, Mergili, & D'Agostino, 2021), las cuales se caracterizan por ser uno de los fenómenos naturales con más capacidad destructiva debido a su gran magnitud, corta duración y altas velocidades alcanzadas por el flujo, además de las violentas fuerzas de impacto (Cheng, Huang, Zhang, & Xu, 2022; Garzon, Becerril, & Garrote, 2009; Montoya, Silvia, & González, 2009; Tommaso *et al.*, 2021; Zhang, Lyu, & Li, 2022). En el contexto

tropical, generalmente son detonadas por lluvias (Slaymaker, 1988; Wieczorek & Glade, 2005); por lo tanto, muchos estudios han intentado vincular este factor con flujos torrenciales proponiendo umbrales críticos de precipitación. Por ejemplo, Zhao *et al.* (2022) analizaron umbrales de lluvia mediante el desarrollo de un algoritmo de procesamiento de datos de precipitaciones y establecieron modelos de predicción que permiten evaluar la probabilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales en China Central. Asimismo, Guerrero y Aristizábal (2019) determinaron umbrales de lluvia críticos detonantes de estos eventos en el Valle de Aburrá, a partir del método RTI (índice de lluvia detonante) desarrollado en Taiwán (Guerrero & Aristizábal, 2019). Además, Marulanda (2017) evaluó este mismo factor de precipitación aplicado a los flujos torrenciales desencadenados en Manizales (Colombia) y Mocoa (Colombia).

En Colombia se registraron 1 643 avenidas torrenciales entre los años 1920 y 2017 según la base de datos DesInventar, donde la región más afectada fue la Andina, con el 72 % de los recuentos; tan solo en el departamento de Antioquia se presentaron 28 % de los eventos, de los que 187 corresponden al Valle de Aburrá (Guerrero & Aristizábal, 2019). Estos últimos están relacionados con lluvias de alta intensidad y poca duración presentadas en las diferentes cuencas; además, dependen de factores como las condiciones geomorfológicas, topográficas y climáticas de la zona (Acosta, 2012).

Debido a la complejidad del fenómeno, se han desarrollado herramientas de análisis basadas en la aplicación de modelos computacionales necesarios para la gestión de riesgos de desastres naturales, en los que se evalúan parámetros de amenaza y vulnerabilidad (Medina *et al.*, 2008; Rickenmann *et al.*, 2006; Tommaso *et al.*, 2021;

Vera & Albarracín, 2017; Wang, Yu, Gong, & Yuan, 2020). En las últimas dos décadas se han analizado estos eventos con modelos bidimensionales, como: (1) FLATModel, el cual ha sido utilizado por Bateman, Medina, Hürlimann y Velasco (2007) en el estudio de diferentes flujos de alta pendiente en cuencas de la región pirenaica, reproduciendo el comportamiento de propagación de este fenómeno (Bateman *et al.*, 2007); por su parte, Medina *et al.* (2008) usan esta herramienta para generar mapas de comportamiento de tres avenidas torrenciales en el noreste de la península Ibérica (Medina *et al.*, 2008), y Papa, Sarno, Vitiello y Medina (2018) estudiaron un evento de esta misma índole en la costa de Amalfi (Italia), reconstruyendo el proceso de distribución de flujo mediante el modelo de Voellmy ejecutado por el simulador (Papa *et al.*, 2018); (2) FLO-2D, esta herramienta ha sido aplicada a eventos presentados en zonas como Taiwán (Chen & Wang, 2017; Hsin, Fei, & Chin, 2013) y Guatemala (Salas, Sellés, Plaza, & Girón, 2019), para evaluar parámetros de profundidad y velocidad del flujo, estimando las áreas afectadas por las fuerzas de impacto (Kim, Kwak, & Kim, 2018). Ahora bien, en el contexto local se ha evaluado la eficiencia del código computacional FLO-2D para analizar zonas susceptibles a la amenaza por avenidas torrenciales en diferentes zonas del departamento de Cundinamarca (Sierra, 2018); (3) RAMMS, usado para el estudio de flujos torrenciales presentados en el Valle de la Sionne (Suiza) (Christen, Kowalski, & Bartelt, 2010) y Mocoa (Colombia) (Reyes *et al.*, 2018), en los cuales se caracterizaron variables como la lámina de flujo, magnitud de velocidad y volumen depositado en el área de estudio, lo que permite crear mapas de zonas de riesgo. Asimismo, se utiliza otro tipo de simuladores, como el r.avaflow, el cual se basa en modelos multifásicos,

que representan con mayor precisión el fenómeno de propagación y arrastre, a expensas del aumento de la complejidad de la herramienta y costo computacional (Mergili, Fischer, Krenn, & Pudasaini, 2017; Pudasaini & Mergili, 2019), y ha sido empleado en la modelación de avenidas torrenciales, al reproducir con precisión el proceso de propagación y la formación del abanico aluvial (Tommaso *et al.*, 2021).

En este trabajo se evalúan las capacidades de la herramienta de simulación r.avaflow para reproducir dos avenidas torrenciales ocurridas en el Valle de Aburrá durante el periodo húmedo 2010-2011, donde se presentó una fuerte fase fría del fenómeno ENSO (El Niño-Southern Oscillation); en detalle, se obtienen los campos de presiones y profundidades de flujo, los cuales son necesarios para el diseño de obras de contención que mitiguen los efectos de este fenómeno; de igual forma, se simula el proceso de propagación del flujo, lo que permite crear mapas de riesgo analizando zonas de vulnerabilidad. El análisis parte de la detección de los umbrales de precipitación que detonaron los eventos torrenciales en las cuencas tropicales de análisis y termina con la modelación de los eventos, por lo que aporta una metodología simple, pero efectiva para el análisis de este tipo de fenómenos en ambientes tropicales.

Zonas de estudio

El Valle de Aburrá es un valle interandino localizado en Sudamérica, al noroccidente de Colombia, con elevaciones entre 1 300 y 2 800 msnm, tal como se muestra en la Figura 1. Hoy en día se encuentra densamente habitado con cerca de cuatro millones de habitantes; sus laderas son

objeto de desarrollo constante debido a la necesidad de unidades habitacionales. El Valle se caracteriza por una ladera occidental, donde se localiza la cuenca de la quebrada La Bermejala (ver municipio La Estrella en la Figura 1), de menor pendiente que la ladera oriental, donde se localiza la cuenca de la quebrada El Cedro (ver municipio Copacabana en la Figura 1). Los drenajes en ambas laderas tributan sus aguas y sedimentos al denominado Río Aburrá-Medellín.

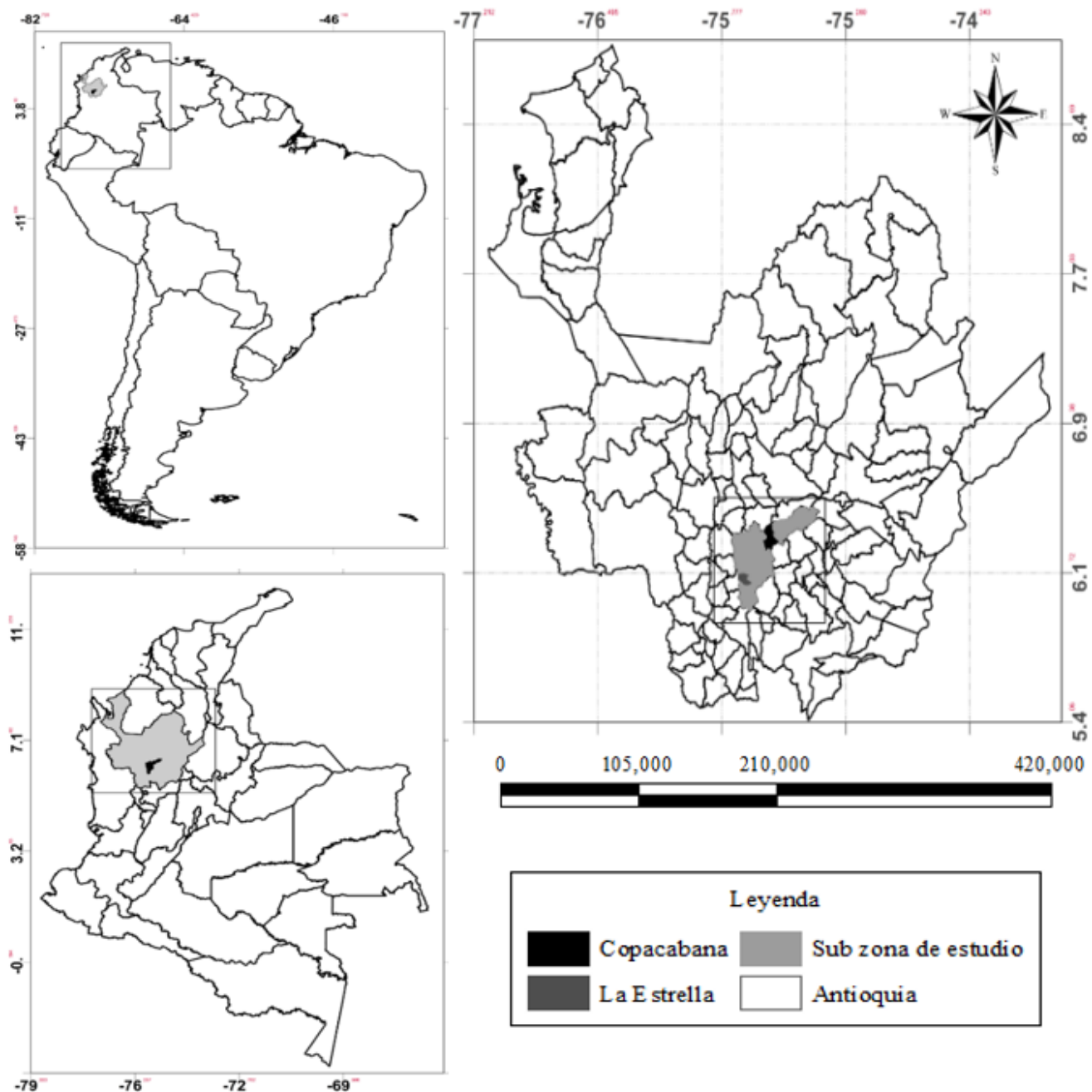


Figura 1. Localización de las zonas de estudio de Copacabana y La Estrella. La ubicación de la zona de estudio se muestra en el continente sudamericano (figura superior izquierda), en Colombia (figura inferior izquierda), y en el departamento de Antioquia (figura superior derecha).

La climatología local se caracteriza por exhibir dos temporadas secas y dos temporadas de lluvias condicionadas por el paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre el territorio (Siata, 2018). Las temporadas secas ocurren durante los trimestres diciembre-enero-febrero y junio-julio-agosto, mientras que las temporadas de lluvia suceden durante los meses intermedios, es decir, marzo-abril-mayo y septiembre- octubre-noviembre. Por otro lado, los eventos torrenciales aquí analizados se han presentado en las temporadas de lluvia durante la tarde o noche, pues el régimen pluviométrico está caracterizado por lluvias convectivas de gran intensidad y de corta duración que ocurren principalmente en horas de la tarde, y lluvias estratiformes en las horas de la madrugada. La precipitación promedio anual en las cuencas de estudio supera los 1 000 mm/año (Tabla 1). Además, estas cuencas se caracterizan por tener altas pendientes, una geología predominante de rocas metamórficas, y una alta tasa de urbanización. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las cuencas.

Tabla 1. Características físicas y climatológicas de las cuencas de estudio.

Cuenca	Área (km ²)	Pendiente media (%)	Geología predominante	Precipitación promedio multianual (mm/año)
El Cedro	0.408	55	Metamórfica	1 413.7
La Bermejala	0.037	63	Metamórfica	2 490.7

Quebrada La Bermejala

Este afluente se localiza en el sur del Valle de Aburrá, en el municipio de La Estrella. La litología de la cuenca está compuesta por esquistos cuarzo sericíticos del Grupo Ayurá-Montebello, rocas volcánicas sedimentarias de la formación Quebradagrande, gabros, dunitas serpentizada y suelos transportados. En superficie se encuentran depósitos de ladera, aluviones, suelos residuales y algunos afloramientos rocosos. Las elevaciones en la cuenca varían entre 972.45 y 1 955.07 msnm y las pendientes entre 0 y 88.56 % (Figura 2).

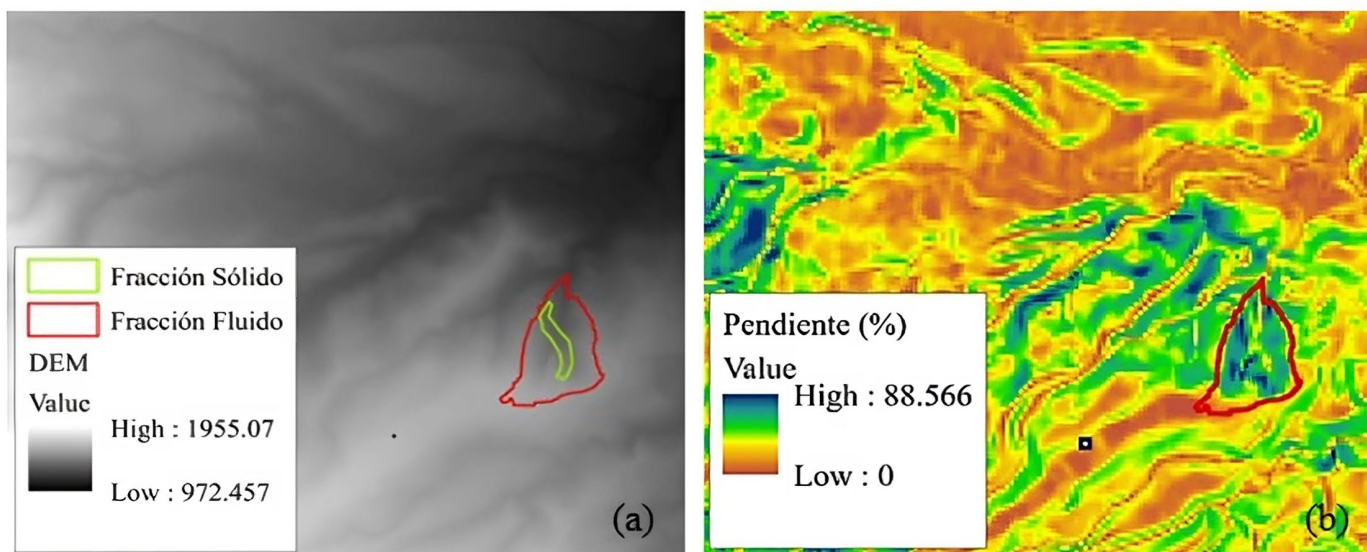


Figura 2. (a) Modelo de elevación digital y delimitación de la cuenca La Bermejala; (b) mapa de pendientes de la cuenca La Bermejala.

Quebrada El Cedro

Este afluente se localiza en el norte del Valle de Aburrá, en el municipio de Copacabana, y se caracteriza por depósitos cuaternarios que reposan sobre un basamento de roca tipo anfibolita, en algunos casos cubiertos por material antrópico y ceniza volcánica. Las elevaciones en la cuenca varían entre 1 378 y 2 044.75 msnm, y las pendientes entre 0 y 80.12 % (Figura 3).

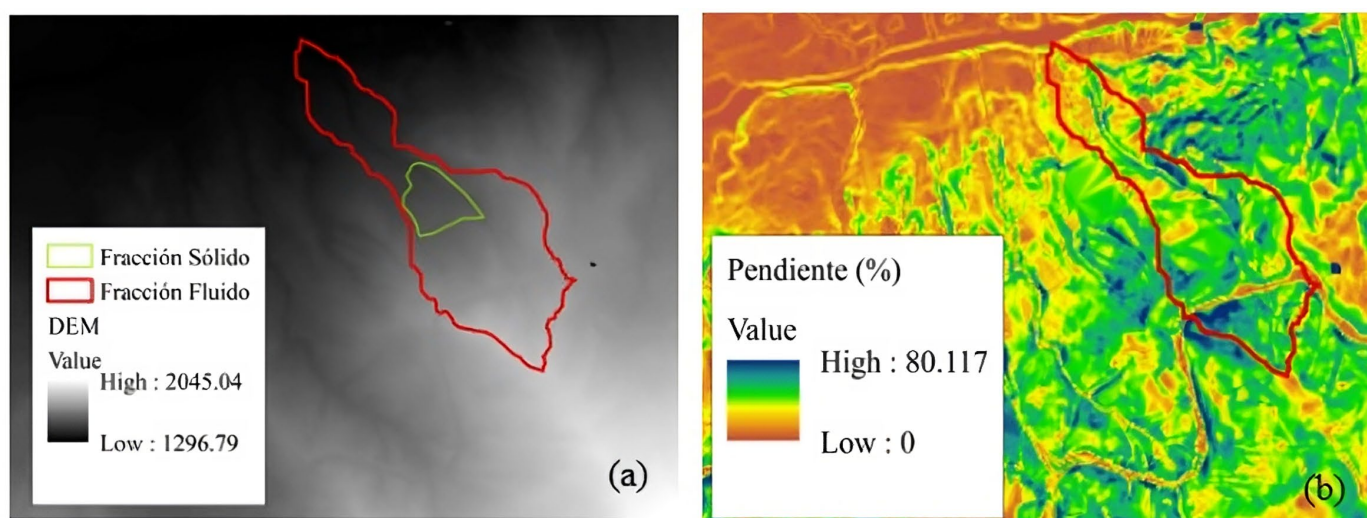


Figura 3. (a) Modelo de elevación digital y delimitación de la cuenca El Cedro; (b) mapa de pendientes de la cuenca El Cedro.

Descripción de los eventos

El fenómeno oceanoatmosférico ENSO (El Niño-Oscilación del Sur), ocurre en el trópico sudamericano (Poveda & Mesa, 1996), y está compuesto por dos fases opuestas: una de calentamiento denominada “El Niño” (en Colombia está asociada con sequías) y otra de enfriamiento conocida

como “La Niña” (en Colombia es sinónimo de lluvias intensas relacionadas con inundaciones, avenidas torrenciales y crecientes súbitas).

Según el análisis realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el episodio calificado como el más violento e intenso en el último siglo de la fase La Niña fue el registrado en los años 2010-2011, donde los excesos de humedad se presentaron entre abril de 2010 y mayo de 2011. Esta crisis invernal afectó a miles de personas y ocasionó tanto pérdidas civiles como económicas.

De acuerdo con lo anterior, el efecto climático de La Niña trajo consigo eventos torrenciales como los registrados el 21 de noviembre de 2010 (Figura 4a) en el municipio de La Estrella, que fue generado por la creciente súbita de la quebrada La Bermejala; este evento dejó una persona muerta y ocasionó la reubicación de 14 familias. De manera similar, el 27 de abril de 2011 se presentó un movimiento de masa de aproximadamente 20 000 m³ (ver Figura 4b), el cual destruyó siete viviendas y dejó en riesgo de colapso otras cinco; este evento interrumpió la vía Machado, en jurisdicción del municipio de Copacabana, afectando el flujo vehicular de la autopista Medellín-Bogotá y obligó a la reubicación de más de 20 familias.



Figura 4. Registro fotográfico aéreo del terreno después del evento presentando (a) en La Estrella (21 de noviembre de 2010) y (b) en Copacabana (27 de abril de 2011).

Datos y métodos

Los datos de precipitación con **resolución diaria** fueron obtenidos de los registros de las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). En la Tabla 2 se presentan las coordenadas de ubicación de las estaciones de medición empleadas.

Tabla 2. Estaciones de precipitación.

Código	Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Municipio
27015260	La Salada	-75.62	6.04	Caldas
27015090	Tulio Ospina	-75.55	6.31	Bello

Por otra parte, se utilizó la cartografía a escala 1:2000 del proyecto SIGMA para generar los modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés). Asimismo, se utilizaron los datos geotécnicos de las zonas producto de los estudios de suelos y estabilización, en particular el ángulo de fricción interno del material, que para los casos de las cuencas El Cedro y La Bermejala correspondieron a 29.00° y 20.72°, respectivamente.

Etapas 1: análisis hidrológico

El análisis inicial se encaminó a verificar qué tan elevadas fueron las precipitaciones de los años 2010-2011 con respecto a los promedios multianuales (ciclo anual) registrados en cada una de las estaciones de análisis para los periodos 1984-2023 (La Salada) y 1950-2023 (Tulio

Ospina). Utilizando esta información se obtuvieron las curvas comparativas entre las precipitaciones en los meses de cada evento con respecto a los promedios multianuales (Figura 7).

Después se analizaron los registros del día del evento y de los días previos, a fin de detectar patrones emergentes en cuanto a las condiciones de precipitación acumulada antecedente y el umbral de lluvia que desencadenó los eventos; para esto, se graficó la curva de precipitación diaria acumulada de los meses de cada evento, es decir, para noviembre de 2010 y abril de 2011 (Figura 8).

Luego se acumuló la precipitación con un ventaneo de 30 días, desplazándose día por día de la siguiente manera:

$$y_{n+30} = \sum_{i=n}^{n+30} x_i$$

Con $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, donde $y_{(n + 30)}$ es la precipitación acumulada en los últimos 30 días en el día $n + 30$ (Figura 9), aplicando esta operación en los años en los que se presentó los eventos y los años inmediatamente anteriores a estos (2009, 2010, 2011), con el fin de identificar comportamientos atípicos en los registros de precipitaciones y seleccionar regiones anómalas que pudieron ser factores determinantes en la detonación de los eventos torrenciales (Figura 9). Finalmente, se construyen curvas de masa anuales para conocer la distribución temporal anual de las precipitaciones entre los años 2009 y 2011 (Figura 10).

Etapa 2: simulación y calibración del proceso de propagación

El análisis de la propagación de los flujos de cada uno de los eventos se realizó a través del *software* r.avaflow, el cual es una herramienta computacional que emplea el esquema numérico NOC-TVD (Wang, Hutter, & Pudasaini, 2004) y basado en sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) de código abierto utilizado para la simulación de flujos de masa complejos sobre topografías arbitrarias. El r.avaflow fue desarrollado por Martin Mergili y Shiva P. Pudasaini, utiliza los lenguajes de programación Python para procesos de administración, preprocesamiento y posprocesamiento de datos; el lenguaje de programación C para la reproducción de la propagación de los flujos, y lenguaje R para cálculo estadístico y gráficos empleados en la validación y visualización (Mergili & Pudasaini, 2021). Esta herramienta de simulación incluye dos modelos: uno es el modelo monofásico denominado Voellmy y el otro es el modelo de Pudasaini (utilizado en este trabajo), en el cual se consideran flujos multifásicos mediante la mezcla de sólidos y fluidos que interactúan entre sí, considerando explícitamente el arrastre y parada del material hasta llegar a la zona de depositación (Mergili *et al.*, 2017).

Con referencia al modelo bifásico de Pudasaini, se determina que se emplea para analizar la dinámica de los flujos de masa que se mueven desde un área de liberación definida (por lo que es necesario asignar alturas de sólidos y fluidos) a través de un DEM. La evolución espacio-temporal del flujo sobre la topografía definida se aproxima mediante ecuaciones de balance de masa (considerando sólido y fluido) y de

momento (Pudasaini, 2012). Las entradas esenciales de este modelo reológico son las siguientes: (1) un DEM que representa la elevación de la superficie basal antes del evento que se está investigando; (2) mapas de distribución espacial de las alturas de los sólidos y fluidos (para este caso, los desechos de los eventos torrenciales se consideran componentes sólidos y el umbral definido a partir del análisis hidrológico se considera la fracción de fluido), y (3) un conjunto de parámetros que describen la reología del flujo (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros reológicos del flujo utilizados para la simulación.

Símbolo	Parámetro físico	Unidad	Valor (La Bermejala)	Valor (El Cedro)
ρ_s	Densidad del material sólido	kg m ⁻³	2 700	
ρ_f	Densidad del material fluido	kg m ⁻³	1 000	
φ	Ángulo de fricción interno	Grados	20.72	29.00
δ	Ángulo de fricción basal	Grados	20.00	18.00

Datos de entrada para la simulación

1. Parámetros reológicos del flujo (Tabla 3).

Es importante señalar que los valores utilizados en las densidades son iguales, ello se debe a que no se encontraron registros de estos parámetros para los eventos de análisis, por lo que se emplearon los que por defecto propone el simulador.

2. Modelo de elevación digital (DEM):

Se construyó a partir de la cartografía de cada una de las cuencas de estudio (El Cedro, La Bermejala), utilizando el *software* QGIS 3.12, con una resolución de pixel de 2 x 2 m (Figura 2 y Figura 3).

3. Mapas ráster de la distribución espacial de las alturas del fluido:

Empleando el *software* de uso libre QGIS 3.12 se trazaron las cuencas hidrográficas de estudio (El Cedro y La Bermejala), con lo cual se obtuvieron los drenajes afectados por las avenidas torrenciales (Figura 2a y 3a). En seguida se generaron los mapas ráster de alturas de fluido para cada evento (en el que su altura máxima corresponde al umbral determinado en el análisis hidrológico), suponiendo que la precipitación es uniforme sobre el área de drenaje (Figura 5) y fuera de esta zona se considera una elevación cero y un tamaño de pixel igual al del modelo de elevación digital.

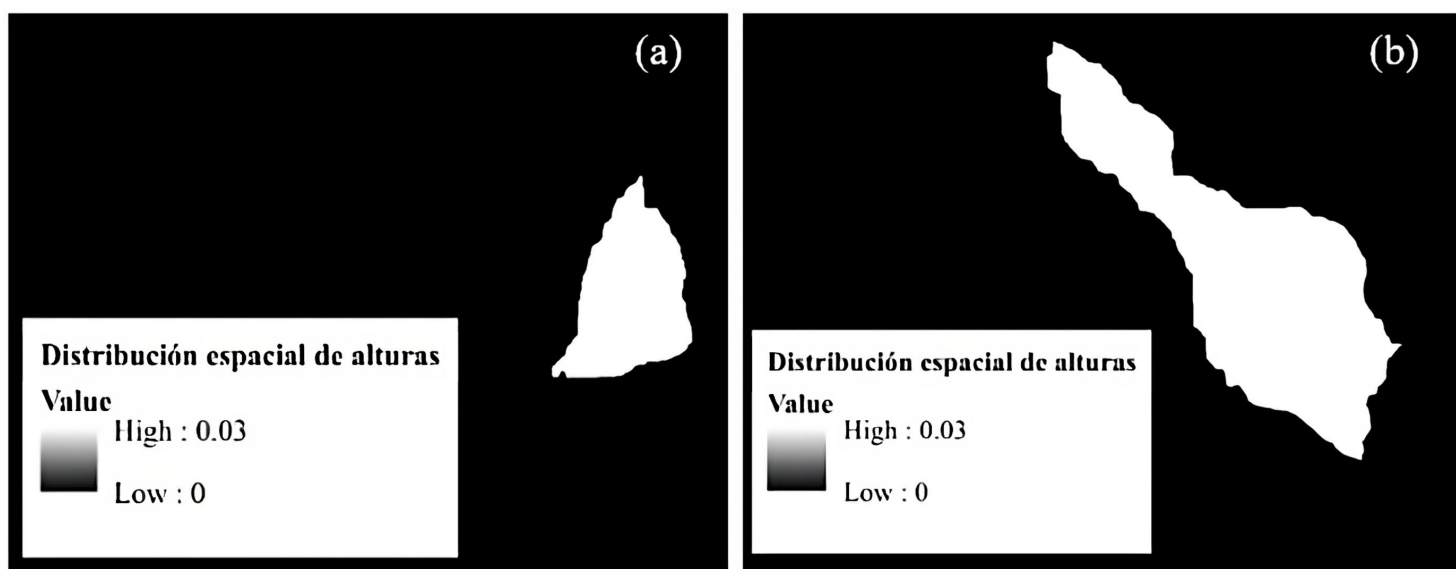


Figura 5. (a) Alturas de fluido, cuenca La Bermejala; (b) alturas de fluido, cuenca El Cedro.

4. Mapas ráster de la distribución espacial de las alturas del sólido:

Para el mapa ráster del sólido fue necesario delimitar previamente una fracción de las cuencas analizadas, que se consideró el área que se desprendió del terreno generando la avenida torrencial (Figura 2a y 3a); se realizó mediante análisis visual en un recorrido espacio temporal de la zona mediante el *software* Google Earth; después se generaron los mapas ráster. Cabe resaltar que para analizar la sensibilidad del simulador respecto a la altura del sólido se varió la elevación de este entre 0.1 y 1.0 m, es decir, se generaron 10 mapas ráster, cada uno con elevaciones diferentes dentro del área removida y fuera de este con una elevación cero, con una extensión y un pixel igual al del modelo de elevación digital (Figura 6).

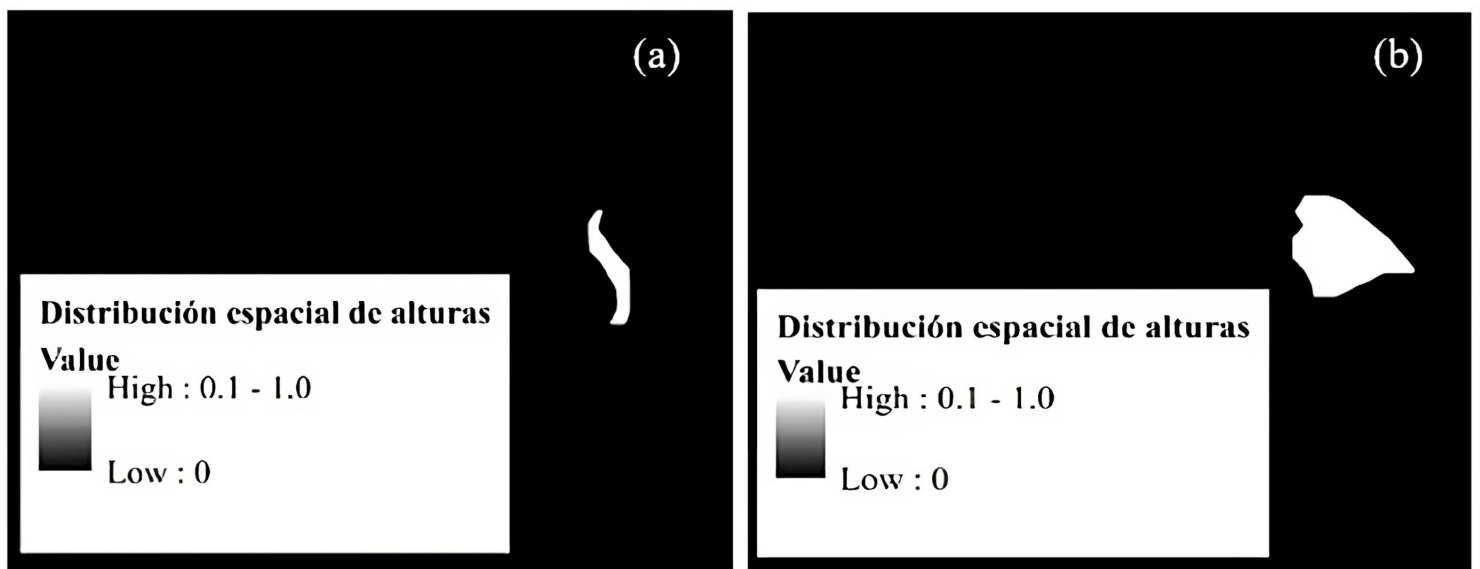


Figura 6. (a) Alturas de sólido, cuenca La Bermejala; (b) alturas de sólido, cuenca El Cedro.

Al tener estos parámetros de entrada, los mapas ráster se convirtieron a formato ASCII y se inició el proceso de modelación en el r.avafLOW. En total se llevaron a cabo 10 corridas en cada una de las cuencas, con un tiempo de simulación $t = 10$ s, con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo al variar el espesor del área removida.

Etapas 3: comparación de datos

A fin de validar la capacidad de la herramienta r.avafLOW se compararon las morfologías obtenidas en las 10 corridas del modelo con los registros satelitales de cada evento (Figura 4); por otro lado, el proceso de calibración se hizo variando las alturas de la fracción de sólido de cada una de las cuencas desde 0.1 hasta 1.0 m para finalmente comparar el volumen entregado por la herramienta versus el volumen de material desprendido reportado para los eventos.

Resultados

Análisis hidrológico

Del ciclo anual contrastado con los años 2010-2011, se identifica que en efecto las precipitaciones en los meses de cada evento (noviembre de 2010 y abril de 2011) fueron superiores al promedio multianual del periodo 1984-2023 para la cuenca La Bermejala y del periodo 1950-2023 para la cuenca El Cedro (Figura 7). En particular, se observa una gran diferencia en los registros de la estación Tulio Ospina durante abril de

2011 (Figura 7b), lo que también se refleja en la magnitud del evento ocurrido en Copacabana, donde el área afectada fue mucho mayor (Figura 4b).

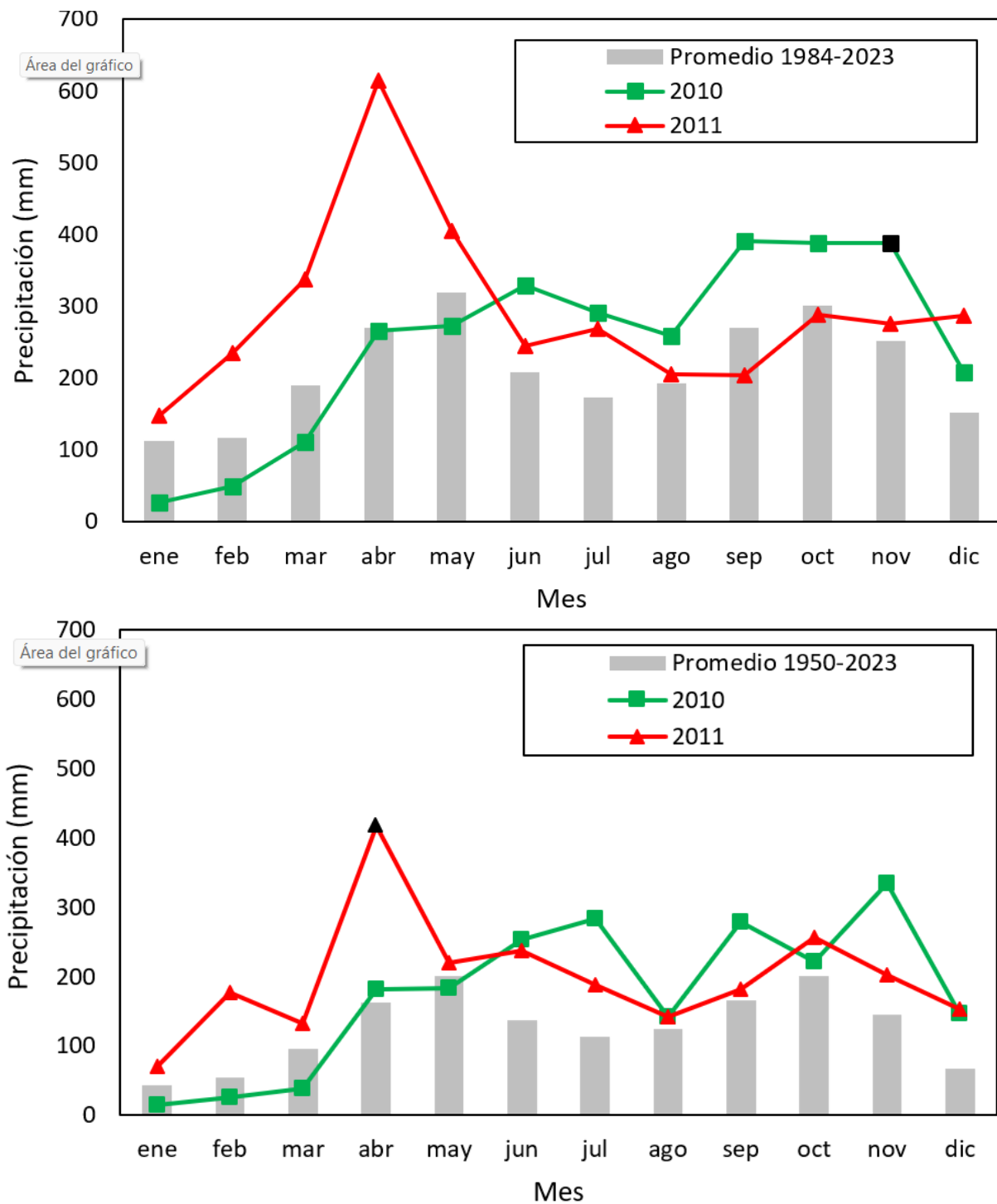


Figura 7. Ciclo anual y precipitación mensual 2010-2011, estación La Salada (arriba) y Tulio Ospina (abajo).

Del análisis de las condiciones de precipitación acumulada antecedente al día del evento tanto en Caldas (Figura 8, izquierda) como en Copacabana (Figura 8, derecha) se observa que los eventos se presentaron después de superado el umbral de los 200 mm de precipitación acumulada, lo que permite tener un valor de referencia para el sistema de gestión del riesgo, y que podría ser incorporado al Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (Siata), con el fin de prever condiciones de tipo torrencial en otras cuencas hidrográficas del Valle de Aburrá (Colombia).

Por otro lado, con relación a la precipitación diaria, se observa que ambos se presentaron luego de superado el umbral de los 30 mm (ver Figura 8) (este valor será considerado en la modelación como la altura del fluido sobre toda la cuenca, es decir, el *input* de lluvia que genera el flujo torrencial). Por último, es necesario indicar que no se realizan análisis de las intensidades de lluvia, pues los registros diarios tienden a suavizar los valores de intensidad real.

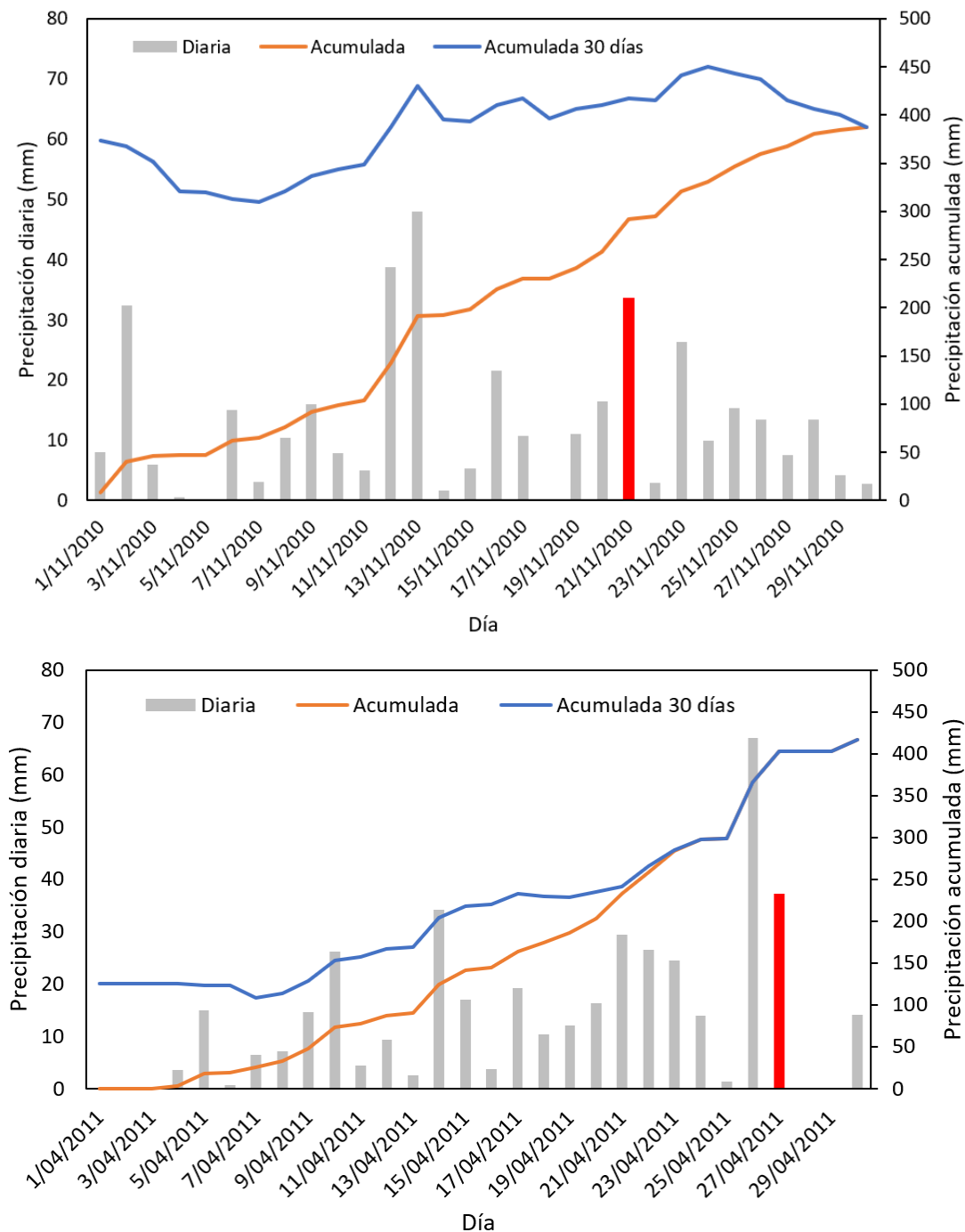


Figura 8. Registros de lluvia diaria, mes del evento de La Estrella (21 de noviembre de 2010) (arriba) y Copacabana (27 de abril de 2011) (abajo).

De la convolución realizada a los registros de lluvia se determina que en los años estudiados (2010, 2011), la magnitud (mm) de las precipitaciones aumentaron entre 50 y 150 % con respecto a los años anteriores (Figura 9); específicamente en los meses de noviembre de 2010 (Figura 9a) y abril de 2011 (Figura 9b) se reportaron las precipitaciones más altas (de 403 a 417 mm) en relación con los demás meses del año.

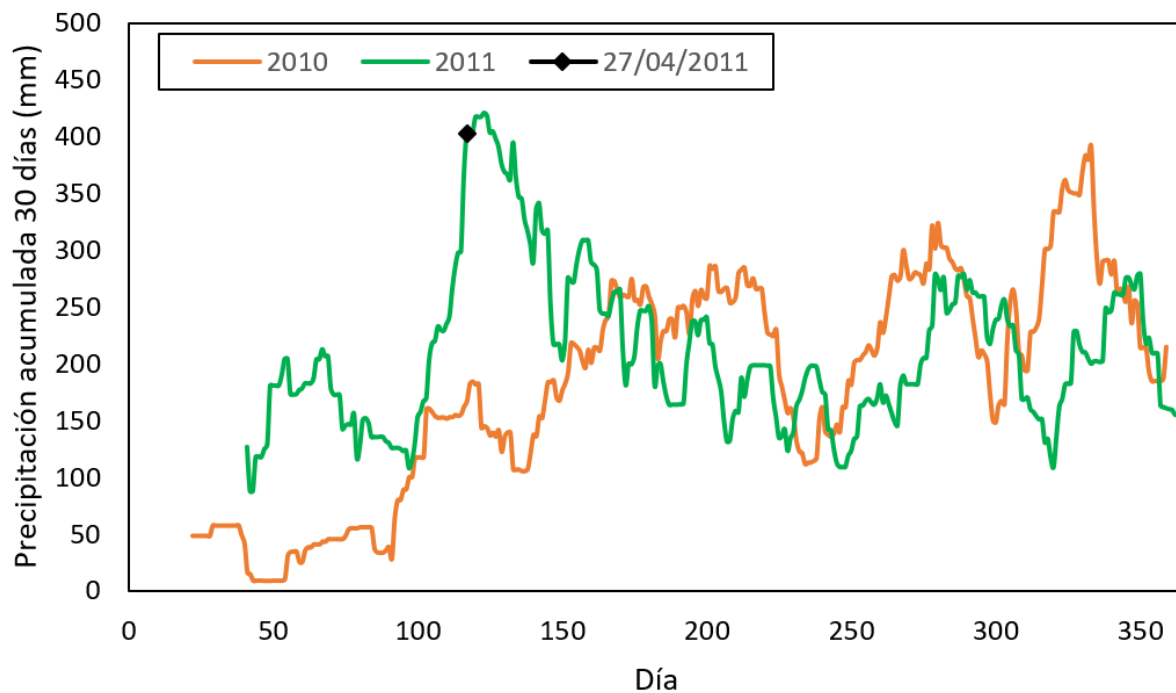
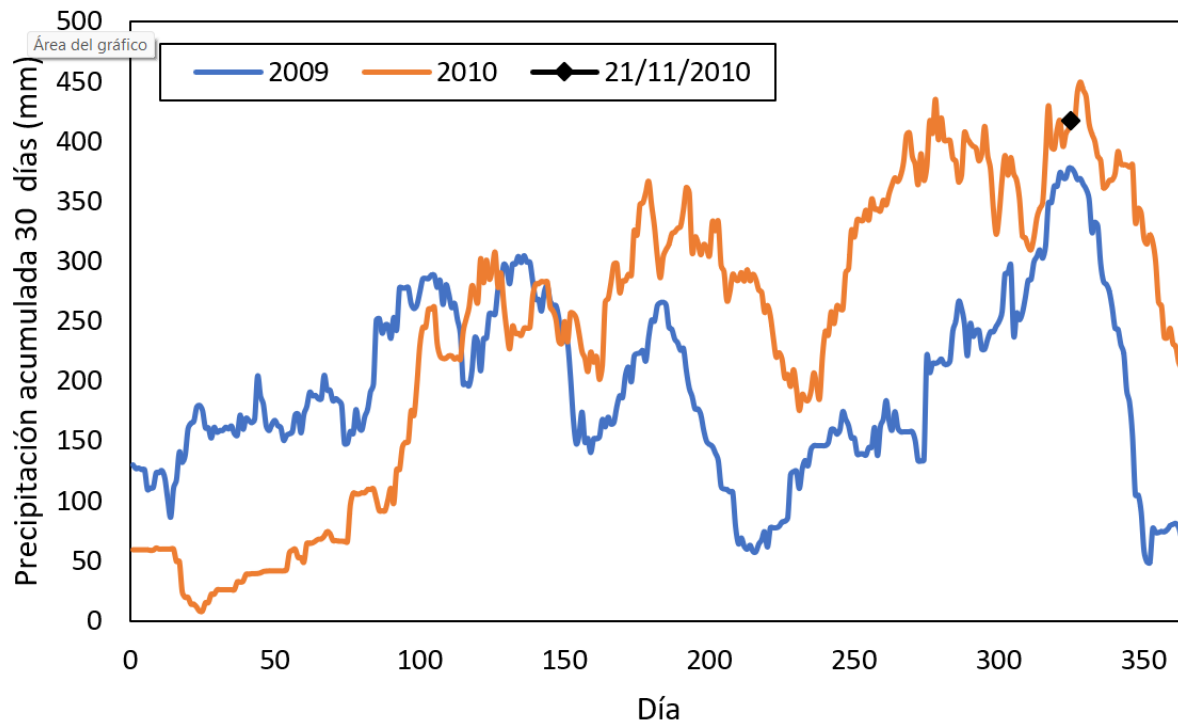


Figura 9. Precipitación acumulada en 30 días (arriba) La Estrella (21 de noviembre de 2010) y (abajo) Copacabana (27 de abril de 2011).

Ahora bien, al comparar los eventos se identifica que en el caso de Copacabana (27 de abril de 2011) se presenta un cambio más abrupto entre el registro de lluvia del día en el que ocurrió la avenida torrencial y los días anteriores (Figura 9b), lo que demuestra un comportamiento anómalo relacionado con la magnitud del evento y es proporcional al área de afectación registrada en los reportes satelitales (Figura 4b).

Finalmente, de las curvas de masa anuales (Figura 10) de los años 2009 a 2011 se identifica que efectivamente los años 2010-2011 fueron más lluviosos que los años antecedentes y además se observa el comportamiento de la distribución temporal de la precipitación.

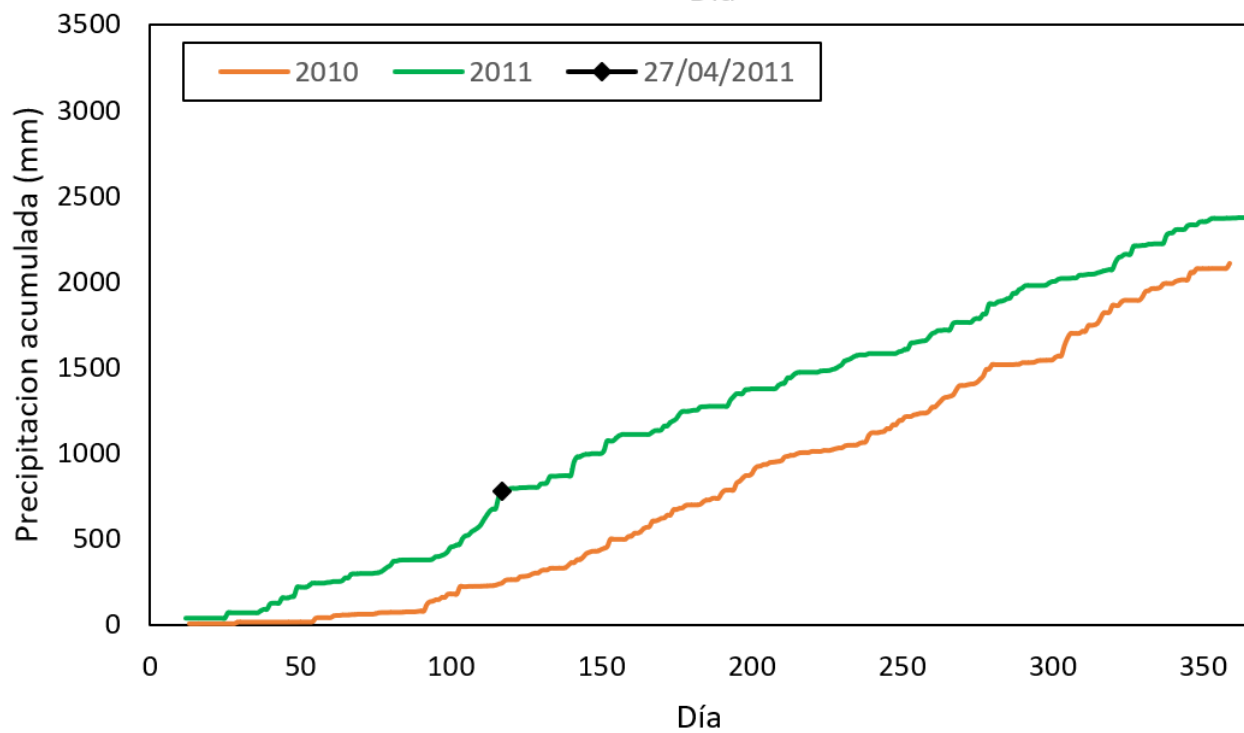
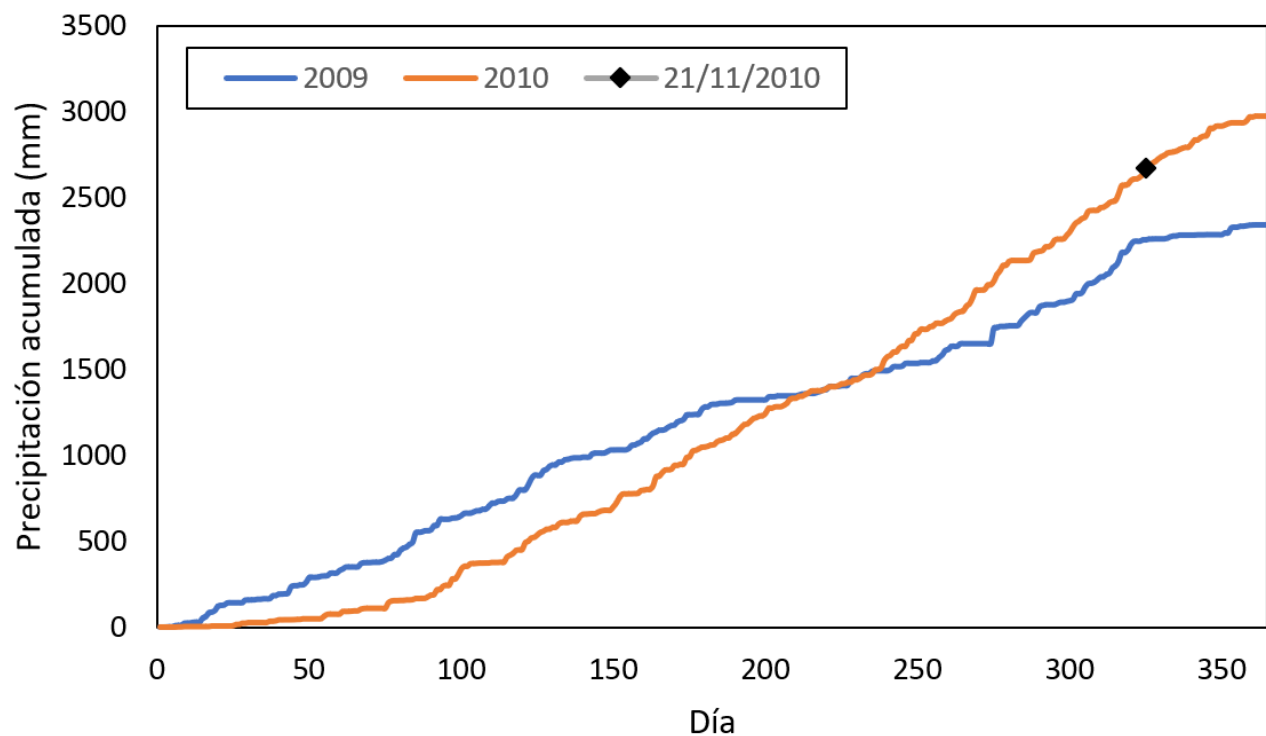


Figura 10. Curvas de masas anuales para las estaciones La Salada (arriba) y Tulio Ospina (abajo).

Modelación hidráulica

Como resultado de la modelación de la propagación de los flujos, se obtuvieron campos de profundidad y presiones para ambos eventos, de los que se logra reportar tres momentos particulares del flujo, los cuales son los siguientes: (1) estado inicial, (2) estado máximo alcanzado y (3) estado final. El primero está asociado con el tiempo cero ($t = 0$ segundos) de la simulación y el tercero representa el tiempo máximo, el cual corresponde a $t = 10$ segundos.

Es importante resaltar que el proceso de calibración de los modelos se realizó específicamente en la simulación del evento presentado en Copacabana en la cuenca El Cedro debido a que se contaba con el reporte de volumen que permitía generar un valor de referencia para la modelación; quiere decir que se escogió la fracción de sólido (la cual variaba de 0.1 a 1.0) que más aproximó el volumen modelado (21 240 m³) al volumen reportado en campo (20 000 m³) por los organismos que atendieron la emergencia.

En el caso de La Bermejala, se consideró la misma fracción de sólido utilizada en El Cedro (0.45 m), ya que se carece de reportes de volúmenes que sirvan como referencias para el proceso de calibración; en este caso, el proceso fue netamente visual, mediante las imágenes satelitales (Figura 4a) y los registros de manchas obtenidos en los resultados (Figura 11).

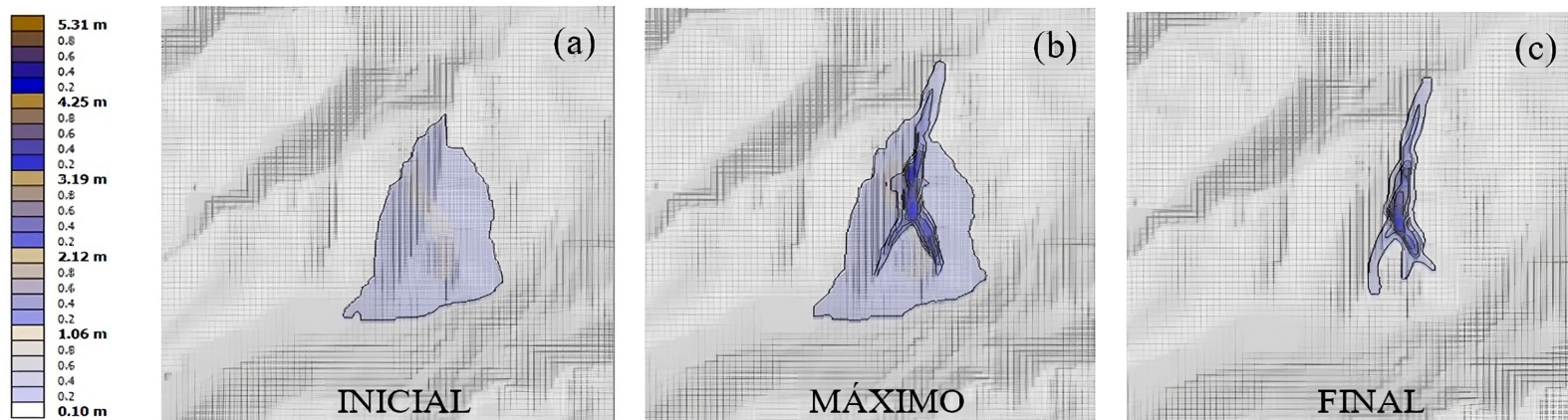


Figura 11. Profundidad del flujo en la cuenca La Bermejala.

- Evento La Estrella (cuenca La Bermejala, 21 de noviembre de 2010)

Las profundidades obtenidas (Figura 11) demuestran un estado inicial (Figura 11a) en el que la cuenca estudiada reporta profundidades de flujo mínimas, que varían de 0.10 a 1.06 m; en este caso, el *software* de simulación asume que el evento torrencial apenas inicia, por lo que la mancha presentada corresponde a la delimitación de la cuenca, considerada en este caso como la distribución espacial del fluido (Figura 5a).

Asimismo, los resultados reportan un momento en el que el flujo alcanza profundidades máximas (Figura 11b), con un rango de 0.10 m a 5.31 m, en este estado interactúan el mapa de distribución del fluido (Figura 5a) con el del sólido (Figura 6a), evidenciando que el mayor rango de profundidad (4.25 m a 5.31) se presenta en la zona considerada como fracción de sólido o área desprendida.

Finalmente, al llegar al tiempo máximo ($t = 10$ segundos), el *software* considera que el evento torrencial terminó, por lo que muestra

un mapa con la morfología creada a partir del arrastre del material (Figura 11c); en este caso la profundidad varía de 0.10 a 4.25 m y se observa que adquiere una forma similar a los reportes satelitales (Figura 4a).

Ahora bien, al analizar las presiones obtenidas (Figura 12) se muestra cómo la distribución espacial de sólido (Figura 6a) interactúa desde el momento inicial ($t = 0$ segundos) con la distribución espacial de fluido (Figura 5a), generándose unas presiones mínimas que varían en un rango de 10 a 107.36 kPa (Figura 12a).

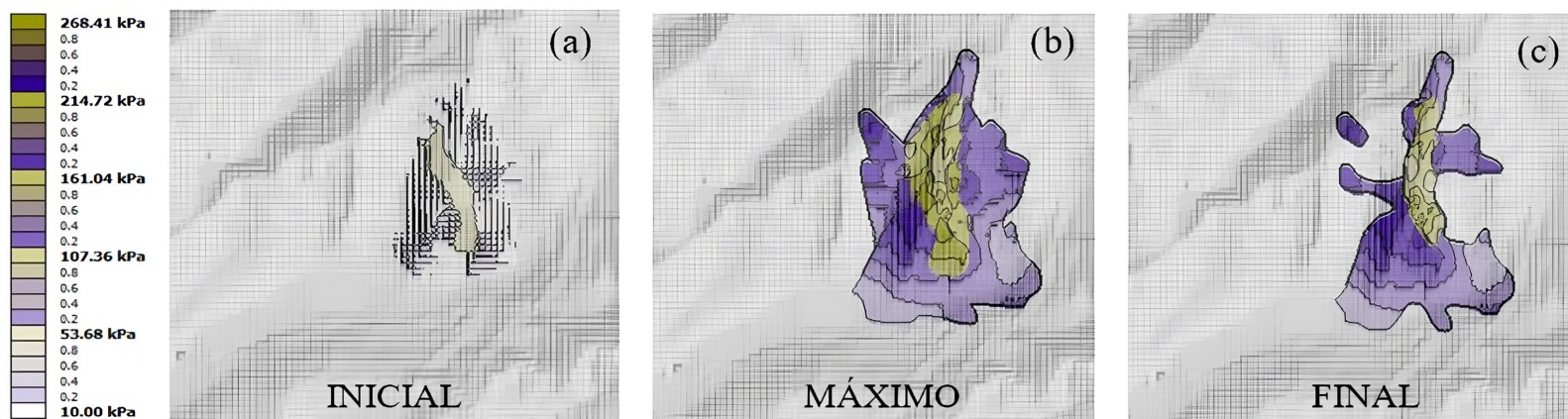


Figura 12. Presión del flujo en la cuenca La Bermejala.

Por otro lado, cabe señalar que el *software* considera que el momento en el que las profundidades del flujo son máximas (Figura 11b), también lo son las presiones (Figura 12b), consideración favorable para el análisis; en este caso, el flujo alcanza un rango de presiones máximo de 53.68 a 268.41 kPa, en donde la mayor presión está representada por la zona considerada como área desprendida (fracción de sólido).

Por último, la simulación arroja unas presiones finales (Figura 12c) que varían en un rango de 53.68 a 214.72 kPa. Es importante anotar que el mapa de presiones muestra una morfología final de abanico aluvial en el que la mayor presión (161.04 a 214.72 kPa) se genera en el centro de la mancha y se distribuye a lo largo de su morfología disminuyendo su magnitud (Figura 12c) debido al impacto generado por el arrastre del material.

- Evento Copacabana (cuenca El Cedro, 27 de abril de 2011)

Los resultados de profundidades (Figura 13) demuestran que para este evento desde el momento inicial ($t = 0$ segundos) interactúan el mapa de distribución espacial de sólido (Figura 6b) con el de fluido (Figura 5b); en este primer estado (Figura 13a), las profundidades del flujo varían de 0.77 a 1.54 m, y reporta mayor profundidad la zona considerada como fracción de sólido (área removida).

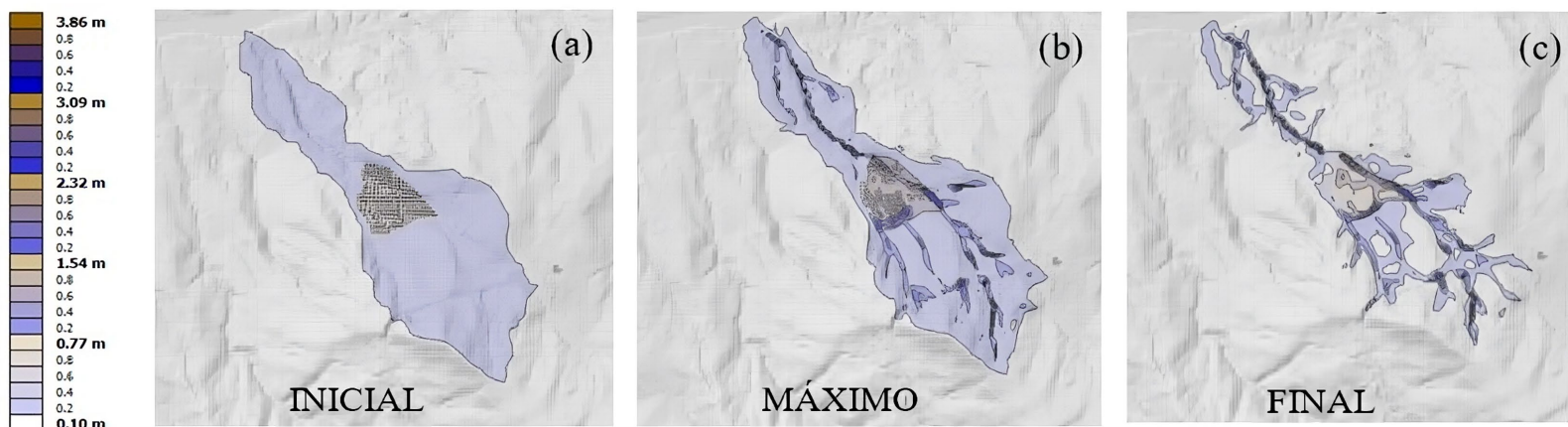


Figura 13. Profundidad del flujo en la cuenca El Cedro.

Al analizar la Figura 13b, se observa cómo el flujo recorre toda el área de drenaje de la cuenca y alcanza profundidades máximas de 3.09 a 3.86 m en la zona central de la mancha; además se aprecia cómo se expande a través del modelo de elevación digital del terreno (DMT) con profundidades que varían de 0.77 a 3.09 m.

A partir de la modelación se logra obtener un volumen de 21 240 m³, con una fracción sólida de 0.45 m, por lo que se detiene la modelación en $t = 10$ segundos, pues el valor del volumen es aproximado al reportado en campo (20 000 m³). En este último escenario se alcanzan profundidades en un rango de 0.77 a 3.09 m (figura 13c) durante todo el recorrido del flujo. Es preciso mencionar que el proceso de arrastre adquiere una morfología de abanico aluvial.

Tras el análisis realizado a los mapas de presiones obtenidos en esta cuenca, se determina que al igual que en la cuenca La Bermejala, los mapas de distribución espacial (sólido y fluido) se relacionan desde $t = 0$ segundos (Figura 14a), y es en la delimitación de la fracción sólida donde se presenta una mayor presión (88.07 kPa), sin embargo, también durante toda la distribución del fluido las presiones varían de 10.00 a 44.03 kPa.

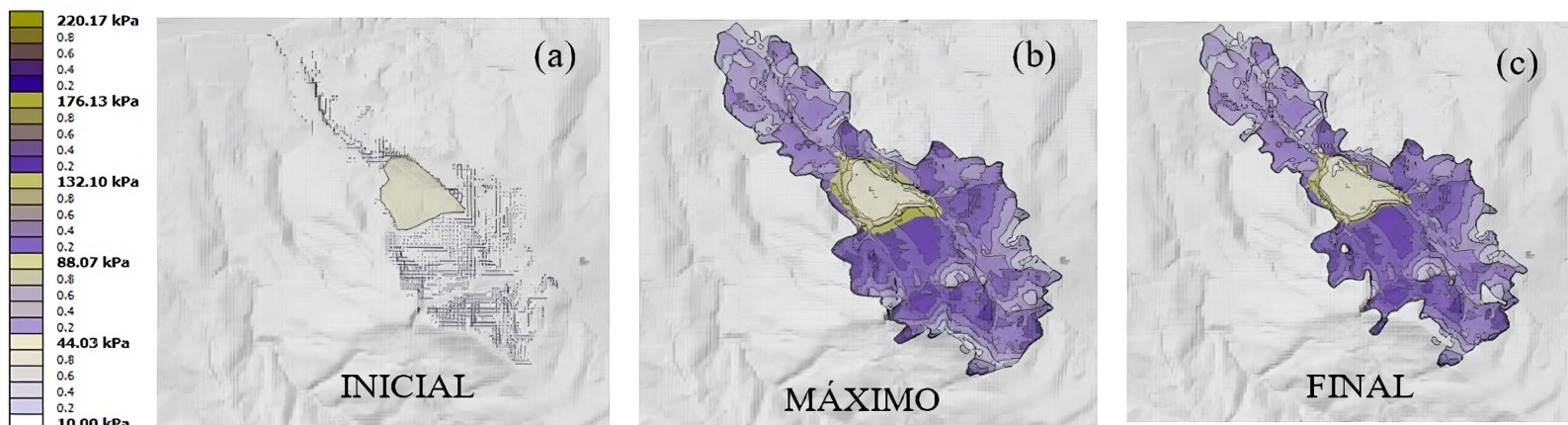


Figura 14. Presión del flujo en la cuenca El Cedro.

Por otro lado, se observa cómo el comportamiento de las presiones máximas (Figura 14b) varía de 44.03 a 220.17 kPa, donde la mayor presión (220.17 kPa) se genera alrededor de la zona que se considera área removida; además, es notorio que al paso que el flujo transita mantiene presiones en un rango de 132.10 a 176.13 kPa.

Por último, de acuerdo con el registro final de las presiones (Figura 14c) se determina que está dentro del mismo rango de variabilidad de las presiones máximas (de 44.03 a 220.17 kPa), sin embargo su morfología describe con mejor detalle la zona por la que transita el flujo, dejando como resultado final una mancha en forma de abanico aluvial similar a la observada en el evento real (Figura 4b).

Mediante el análisis realizado se identifica que en la cuenca La Bermejala (Figura 11 y Figura 12) la fracción sólida del flujo se propaga en una mayor longitud que en la quebrada El Cedro, especialmente en los escenarios finales (Figura 11c y 12c); asimismo, al comparar las profundidades y presiones, se observa cómo la quebrada La Bermejala

alcanza valores superiores (profundidad máxima = 5.31 m, presión máxima = 268.41 kPa) a los que se detallan en El Cedro (profundidad máxima = 3.86 m, presión máxima = 220.17 kPa), a pesar de que el umbral de precipitación (30 mm) empleado en las cuencas fue el mismo; estos comportamientos se asocian con la alta pendiente de la cuenca La Bermejala (63 %).

Discusión

Los resultados señalan que la herramienta de simulación r.avaflow es útil para reproducir fenómenos como las avenidas torrenciales, logrando por ejemplo porcentajes de error menores al 1 % en términos de volumen para la quebrada El Cedro (volumen simulado: 21 240 m³; volumen reportado: 20 000 m³). El proceso de modelación se desarrolló bajo un análisis de sensibilidad, en el que la fracción de sólido varió de 0.1 a 1.0 m; esta metodología es consistente con la utilizada por Mergili *et al.* (2017), quienes evaluaron la avenida torrencial “Acheron” bajo la simulación iterativa y la optimización de parámetros como ángulo de fricción y el contenido de sólido (variando de 0.5 a 0.9 m). Diversos estudios se han enfocado en señalar estos parámetros (ángulo de fricción y la fracción de sólido), como principales variables de ajuste en los procesos de simulación (Mergili, Frank, Fischer, Huggel, Pudasaini, 2018), sin embargo, otros han determinado que parámetros como el tiempo considerado en las corridas de la simulación interfieren en la precisión de resultados (Fischer *et al.*, 2020); en conformidad con esto, se señala que una posible causa en la variación de resultados esta atribuida al poco tiempo de simulación ($t = 10$ segundos), ya que en otros estudios (Mergili,

Jaboyedoff, Pullarello, & Pudasaini, 2020) se han logrado disminuir errores entre volúmenes simulados y reportados hasta un 0.04 %, considerando un tiempo de corrida de 180 segundos, lo cual requiere en muchos casos de un clúster, con el cual no se contaba.

La simulación de las avenidas torrenciales fue precedida por un análisis hidrológico en el que se detectaron que ambos eventos se desencadenaron luego de superar el umbral de 30 mm de precipitación acumulada, considerándolo posteriormente como la fracción de fluido en la modelación, en concordancia con autores como Tommaso *et al.* (2021), que analizaron una avenida torrencial a partir de la construcción de hidrogramas y detectaron un umbral de lluvia detonante de 0.11 m; estos autores logran simular para este evento un volumen de 13 215 m³, presentando un error entre volúmenes simulados y reportados de 0.02 %. Cabe señalar que pese a que la fracción de fluido (0.11 m) considerada por Tommaso *et al.* (2021) es superior a la establecida en el presente trabajo (0.03 m), la altura máxima de flujo simulada por Tommaso *et al.* (2021) (Hmax = 5.35 m) es similar a la presentada en la cuenca La Bermejala (Hmax = 5.31 m) (Figura 11); frente a este panorama, se analizaron características de las topografías de las zonas de estudio y se observó que la pendiente media del modelo de elevación digital de la Bermejala es 63 %, superior a la de la cuenca analizada por Tommaso *et al.* (2021), que corresponde a 42 %. Este análisis concuerda con el estudio realizado por Fischer *et al.* (2020), en el que señalan que también las incertidumbres topográficas en los parámetros de entrada pueden conducir a variaciones en los resultados de simulación.

Por otro lado, en Colombia, entidades como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) ha utilizado la herramienta

de simulación r.avaflow para evaluar diferentes avenidas torrenciales, como la presentada en el municipio de Mocoa el 31 de marzo de 2017, para definir zonas críticas y sitios de implementación de nuevas estaciones de monitoreo para disminución de la incertidumbre en el sistema de alerta temprana (UNGRD, 2018). En este análisis se contemplaron variables como las presiones, obteniendo valores de 981 y 3236 Kpa para volúmenes de 1 562 420 y 1 471 020 m³, respectivamente. Este mismo análisis se desarrolló en el presente trabajo y debido a que los volúmenes de análisis son más pequeños se obtuvieron presiones máximas de flujo menores (Figura 12 y Figura 14) reportando en El Cedro una magnitud de 220 Kpa y en la Bermejala 268 Kpa.

Por último, resulta necesario mencionar que la versión del r.avaflow utilizada (ejecutable para Windows) no cuenta con la opción de cálculo de velocidades de flujo, por lo que no se utilizaron como parámetros de calibración; de igual forma, es pertinente mencionar que las cuencas de estudio carecen de instrumentación que permita conocer el caudal real de los eventos, su variación temporal y los volúmenes depositados, por lo que faltan datos para hacer comparaciones de validación, como es el caso de la cuenca La Bermejala. Así las cosas, es necesario indicar que los resultados obtenidos constituyen una primera aproximación al análisis de los eventos torrenciales.

Conclusiones

En este trabajo se evaluaron las capacidades de la herramienta de simulación r.avaflow para modelar dos avenidas torrenciales ocurridas al norte (El Cedro) y al sur (La Bermejala) del valle de Aburrá en el periodo

húmedo 2010-2011; se encontró que el r.avaflow reproduce con buena precisión (error del orden de 6.2 %) los eventos en términos de volúmenes, no se analiza aquí la precisión en términos de velocidades.

Tras el análisis realizado es pertinente afirmar que los resultados obtenidos de la simulación con el r.avaflow permiten generar mapas de amenaza por avenidas torrenciales, lo que aporta desde la academia a la gestión del riesgo; asimismo, se obtienen parámetros clave (mapas de presiones) para el diseño de obras de contención que permitan la mitigación de los efectos de estos eventos torrenciales.

Finalmente, se determina que a pesar de las nuevas herramientas disponibles sigue existiendo en el medio una falta importante de información que permita analizar y pronosticar fenómenos naturales como los analizados en el presente trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Cooperativa de Colombia por su apoyo financiero mediante los proyectos de investigación INV3211 e INV2399.

Referencias

Acosta, J. H. C. (2012). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el Valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45-50.

- Aristizábal, E., Arango, M. I., & García, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes Colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 242-258. DOI: 10.15446/rcdg.v29n1.72612
- Bateman, A., Medina, V., Hürlimann, M., & Velasco, D. (2007). Modelo bidimensional para simulación de flujos detríticos: FLATModel. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(4), 5-20.
- Chen, C. Y., & Wang, Q. (2017). Debris flow-induced topographic changes: Effects of recurrent debris flow initiation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189:449. DOI: 10.1007/s10661-017-6169-y
- Cheng, H., Huang, Y., Zhang, W., & Xu, Q. (2022). Physical process-based runout modeling and hazard assessment of catastrophic debris flow using SPH incorporated with ArcGIS: A case study of the Hongchun gully. *Catena*, 212. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106052
- Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2), 1-14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005
- Fischer, J. T., Kofler, A., Mergili, M., Huber, A., Fellin, W., & Oberguggenberger, M. (2020). Bayesian inference in snow avalanche simulation with r.Avaflow. *Geosciences (Switzerland)*, 10(5), 1-17. DOI: 10.3390/geosciences10050191

- García, J., Génova, M., Calvet, J., Furdada, G., Guinau, M., & Díez, A. (2015). Datación de avenidas torrenciales y flujos de derrubios mediante metodologías dendrogeomorfológicas (barranco de Portainé, Lleida, España). *Ecosistemas*, 24(2), 43-50. DOI: 10.7818/re.2014.24-2.00
- Garzon, M. G., Becerril, J. A., & Garrote, J. (2009). Las avenidas torrenciales en cauces efímeros: ramblas y abanicos aluviales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (17.3), 264-276.
- 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). *EIA*, 16, 97-111. DOI: 10.24050/reia.v16i32.1281
- Hsin, W. Y., Fei, L. K., & Chin, C. Y. (2013). Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study. *Institute of Mountain Hazards and Environment*, 10(2), 293-304. DOI: 10.1007/s11629-013-2511-1
- Kim, I. M., Kwak, J. H., & Kim, B. S. (2018). Assessment of dynamic impact force of debris flow in mountain torrent based on characteristics of debris flow. *Environmental Earth Sciences*, 77(538), 1-15. DOI: 10.1007/s12665-018-7707-9

- Marulanda, A. (2017). *Lluvias intensas como detonante de deslizamientos y avenidas torrenciales - casos de estudio Manizales y Mocoa. Corpocaldas.* Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/319515742_LLUVIAS_INTENSAS_COMO_DETONANTE_DE_DESLIZAMIENTOS_Y_AVENIDAS_TORRENCIALES_-_CASOS_DE_ESTUDIO_MANIZALES_Y_MOCOA_ABRIL_DE_2017
- Medina, V., Hürlimann, M., & Bateman, A. (2008). Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5(1), 127-142. DOI: 10.1007/s10346-007-0102-3
- Mergili, M., Fischer, J. T., Krenn, J., & Pudasaini, S. P. (2017). R.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*, 10(2), 553-569. DOI: 10.5194/gmd-10-553-2017
- Mergili, M., Frank, B., Fischer, J. T., Huggel, C., & Pudasaini, S. P. (2018). Computational experiments on the 1962 and 1970 landslide events at Huascarán (Peru) with r.avaflow: Lessons learned for predictive mass flow simulations. *Geomorphology*, 322, 15-28. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.08.032
- Mergili, M., Jaboyedoff, M., Pullarello, J., & Pudasaini, S. P. (2020). Back calculation of the 2017 Piz Cengalo-Bondo landslide cascade with r.avaflow: What we can do and what we can learn. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 505-520. DOI: 10.5194/nhess-20-505-2020

- Mergili, M., & Pudasaini, S. (2021). *r.avaflow* (2.4). Recuperado de <https://www.landslidemodels.org/r.avaflow/>
- Montoya, L. J., Silvia, S. M., & González, J. E. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada Doña María. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 11-29.
- Papa, M. N., Sarno, L., Vitiello, F. S., & Medina, V. (2018). Application of the 2D depth-averaged model, FLATModel, to pumiceous debris flows in the Amalfi Coast. *Water* (Switzerland), 10(9), 22. DOI: 10.3390/w10091159
- Poveda, G., & Mesa, Ó. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*, 9(1), 21-37.
- Pudasaini, S. P. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(3). DOI: 10.1029/2011JF002186
- Pudasaini, S. P., & Mergili, M. (2019). A Multi-Phase Mass Flow Model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(12), 2920-2942. DOI: 10.1029/2019JF005204
- Reyes, N., Barros, J. M., Fuentes, C., Barajas, C., Escobar, J., Prada, L. F., & Ramos, A. (2018). Simulación integrada comparativa de avenidas torrenciales. Caso de estudio: Mocoa-Colombia. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Buenos Aires, Argentina.

- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B. W., & Hübl, J. (2006). Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences*, 10, 241-264. DOI: 10.1007/s10596-005-9021-3
- Salas, S. P., Sellés, M. G., Plaza, J. B., & Girón, L. I. (2019). Susceptibilidad a inundación por flujos torrenciales a partir de la integración del método geomorfológico y de la modelización con FLO-2D, lago Atitlán, Guatemala. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(1), 64-75. DOI: 10.22201/cgeo.20072902e.2019.1.783
- Siata, Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá. (2018). *Segunda temporada de lluvias*. Recuperado de https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/noticia1
- Sierra, E. F. (2018). Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales para las quebradas El Chulo y El Tablón en la zona urbana del municipio de Gachetá, Cundinamarca. *Espacios*, 39(8), 13.
- Slaymaker, O. (1988). The distinctive attributes of debris torrents. *Hydrological Sciences Journal*, 33(6), 567-573. DOI: 10.1080/02626668809491290
- Tommaso, B., Mergili, M., & D'Agostino, V. (2021). Advances in the simulation of debris flow erosion: The case study of the Rio Gere (Italy) event of the 4th August 2017. *Geomorphology*, 381, 107664. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107664

- UNGRD, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2018). *Definición de sectores críticos y sitios de implementación de nuevos monitoreos para disminución de la incertidumbre en la definición de los niveles del sistema de alerta temprana*. Bogotá, Colombia: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Instituto Geofísico, Universidad Javeriana.
- Vera, J. M., & Albarracín, A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109-136. DOI: 10.18359/rcin.2309
- Wang, Y., Hutter, K., & Pudasaini, S. P. (2004), The Savage-Hutter theory: A system of partial differential equations for avalanche flows of snow, debris, and mud. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 84, 507-527. DOI: 10.1002/zamm.200310123
- Wang, J., Yu, Y., Gong, Q., & Yuan, S. (2020). Debris flow disaster risk analysis and modeling via numerical simulation and land use assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 979. DOI: 10.1007/s12517-020-05958-8
- Wieczorek, G. F., & Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 325-362). Berlin, Germany: Springer Berlin. DOI: 10.1007/b138657

- Zhang, Y., Lyu, L., & Li, P. (2022). An optimized volume of fluid method for modelling three-dimensional debris flows. Implementation in OpenFOAM, validation, and application in the Aiwa Watershed, Beijing. *Computers and Geotechnics*, 144. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.104651
- Zhao, Y., Meng, X., Qi, T., Li, Y., Chen, G., Yue, D., & Qing, F. (2022). AI-based rainfall prediction model for debris flows. *Engineering Geology*, 296. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106456