

REDUNDANCIA DE LOS UMBRALES DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA AVENIDAS TORRENCIALES DE MOCOCA, PUTUMAYO, COLOMBIA

Alfonso Mariano Ramos-Cañón^{1*}, Maddy Munévar¹, Luis Felipe Prada-Sarmiento², Jorge Escobar-Vargas¹, Andrés Vargas-Luna¹, Andrés Felipe Prieto¹, Nidia Cristina Reyes¹, Maudi Medina¹, Joana Pérez³ y Lina Dorado⁴

1. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

2. Department of Civil and Architectural Engineering, Aarhus University, Aarhus, Dinamarca.

3. Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres, Bogotá, Colombia.

4. Consultora independiente, Bogotá, Colombia.

*Autor de correspondencia: a-ramos@javeriana.edu.co

DOI:

<https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.129>

RECIBIDO

14 de febrero de 2023

ACEPTADO

27 de marzo de 2023

PUBLICADO

1 de julio de 2023

Formato cita

Recomendada (APA):

Ramos-Cañón, A.M., Munévar, M., Prada-Sarmiento, L.P., Escobar-Vargas, J., Vargas-Luna, A., Prieto, A.F., Reyes, N.C., Medina, M., Pérez, J. & Dorado, L. (2023). Redundancia de los umbrales del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales de Mocoa, Putumayo, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 7(2), 142-155. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.129>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

Diseño: Lupe Bezzina

RESUMEN

Se presenta la metodología utilizada para la determinación de umbrales asociados a avenidas torrenciales en el municipio de Mocoa – Putumayo (Colombia). Estos se proponen en términos de precipitación, cota de nivel del agua (msnm) y caudal; y se obtuvieron con soporte en la modelación basada en la física de un escenario de avenida torrencial y su afectación a viviendas cercanas al cauce. Se determinaron también umbrales lluvia - deslizamiento con base en el análisis probabilístico de curvas reportadas en la literatura y su comparación con dos eventos previos ocurridos en Mocoa. Se evidencia la necesidad de la redundancia en la propuesta de los umbrales dada la alta incertidumbre epistémica y aleatoria incluida en el proceso de modelación física, la complejidad del proceso en la ocurrencia de una avenida torrencial y su posterior impacto sobre la protección de la vida, principal objetivo de la gestión del riesgo de desastres, en caso de que el sistema de alerta temprana no tenga el funcionamiento adecuado. Por primera vez se presenta un procedimiento para la generación de los umbrales para un Sistema de Alerta Temprana de avenidas torrenciales en Colombia proveniente de un análisis físico integrado articulado con análisis probabilistas de la información disponible.

PALABRAS CLAVES

Flujo de detritos; Umbrales de lluvia; Deslizamientos de tierra; Sistema de alerta temprana; Gestión de riesgo de desastres, Colombia

THRESHOLDS REDUNDANCY OF EARLY WARNING SYSTEM FOR DEBRIS FLOWS IN MOCOCA, PUTUMAYO, COLOMBIA

ABSTRACT

The study explores a novel methodology to determine 'thresholds' associated with debris flows in the municipality of Mocoa, Putumayo, Colombia. Thresholds are proposed in function of precipitation, water level elevation, and flow rate. Results were obtained with a debris flow physics-based modeling and damage produced on homes near the riverbed. Rainfall-Landslide thresholds were also determined based on the probabilistic analysis of curves reported in the literature and their comparison with two previous events that occurred in Mocoa. Findings show the need for advancing redundancy of the thresholds for several reasons: the high epistemic and random uncertainty included in the physical modeling process, the complexity of the process in the occurrence of the debris flow and its subsequent impact on the protection of life (main objective of disaster risk management) in case the early warning system does not function properly. For the very first time in Colombia, a procedure for determining thresholds for an Early Warning System of debris flow is presented, coming from an integrated physical analysis with probabilistic analyzes of available information.

KEYWORDS

Debris flow; Rainfall thresholds; Landslides; Early warning system; Disaster risk management; Colombia

INTRODUCCIÓN

El Municipio de Mocoa está ubicado en la parte norte del Departamento del Putumayo (ver Figura 1), Colombia, cuenta con una extensión aproximada de 1263 km², un área urbana de 580 km² y rural de 740 km², su población aproximada es de 42725 habitantes de acuerdo con las proyecciones del censo territorial del DANE del 2018 (Rojas, Fernández, & Páez, 2005). El municipio de Mocoa está localizado en la margen derecha del río Mocoa, en la parte baja de las microcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco, estas microcuencas presentan un área de 18 km² y 12.7 km², respectivamente, con predominancia de altas pendientes y bajos tiempos de concentración. El 31 de marzo de 2017 en horas de la noche, las fuertes lluvias en las microcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco y las quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, precedidas de lluvias acumuladas de 4 días, detonaron movimientos en masa que aportaron material sólido al cauce de las quebradas mencionadas y junto con el flujo base, contribuyeron al aumento de caudal y energía, removilizando el material disponible en el lecho de los drenajes por efecto de socavación, condición que generó un evento de avenida torrencial con efectos catastróficos en términos de pérdidas humanas y materiales (García et al., 2017).

El municipio de Mocoa se encuentra en una cuenca caracterizada por su pequeña área con predominancia de altas pendientes (>45% o >24 grados) y bajos tiempos de concentración hidrológica de caudales. De acuerdo con Jojoa (2003), un gran número de eventos fluvio-torrenciales ocurridos en el pasado depositaron grandes bloques (hasta de 12 m de diámetro), producto de las fuertes precipitaciones y las altas pendientes de las zonas montañosas. El autor levantó un inventario de la ocurrencia de flujos de detritos, inundaciones, deslizamientos y sismos desde 1947.

Se destacan eventos de flujos de lodo y escombros en 1947, 1971, 1989 y 1994 en el río Mulato, en 1958, 1994 y 1995 en la quebrada Taruca, en 1960, 1997 y 1998 en el río Mocoa, en 1972, 1989, 1994, 1997 y 1998 en el río Sangoyaco, en 1979 y 1996 en la quebrada Pepino, Además, en 1962 ocurrió un flujo de detritos que ocasionó deposición de materiales similar a la del evento del 31 de marzo de 2017 pero en menor magnitud. En cada época, la magnitud de la afectación dependió de la exposición. En muchos de estos eventos se registraron pérdidas materiales importantes, así como personas fallecidas y desaparecidas. Esto indica que los eventos tipo flujo de lodos y detritos son bastante frecuentes en la cuenca de estudio y están asociados a eventos de lluvia intensos. De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (García et al., 2017), el evento está caracterizado como una avenida torrencial con fuertes evidencias de su potencial de destrucción con un caudal entre 1500 y 12000 m³/s. En el marco de la política de la gestión del riesgo de desastres se contempla el proceso de conocimiento del riesgo, el cual consiste en la identificación, análisis del riesgo, monitoreo y comunicación del riesgo, como soporte para diseñar e implementar sistemas de alerta temprana, cuyo objetivo principal es la preservación de la vida en caso de que se materialice un evento con potencial de ser catastrófico. Teniendo en cuenta los antecedentes de la zona e inmediatamente después del evento del 31 de marzo de 2017, se decretó la situación de desastre y junto a esta, una serie de acciones por parte del gobierno para dar respuesta a las comunidades afectadas y desarrollar la recuperación post-desastre. Una de estas acciones fue el desarrollo de la base del conocimiento para determinar los umbrales para el sistema de alerta temprana (SAT) en la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, contratada por la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Pontificia Universidad Javeriana, 2018). Un Sistema de Alerta Temprana es un conjunto de capacidades relacionadas entre sí para la vigilancia, previsión y predicción de amenazas, evaluación de los riesgos de desastres, así como, actividades, sistemas y procesos de comunicación y preparación, que permite proveer y diseminar información oportuna y eficiente a individuos, comunidades expuestas a una amenaza, instituciones y autoridades, para actuar con tiempo suficiente de antelación y de manera oportuna ante un evento peligroso, a fin de reducir la posibilidad de daños y pérdidas sobre las personas, bienes y servicios, infraestructura, sistemas productivos y medio ambiente (ONU, 2016).

De manera general, un SAT consta de los siguiente componentes: 1) Conocimiento del riesgo de desastres basado en la información, estudios y cuantificación de estos, 2) Detección, monitoreo, análisis y pronóstico de las amenazas y sus posibles consecuencias, 3) Comunicación y diseminación de las alertas que permitan desarrollar acciones de respuesta a tiempo y precisas, y 4) Capacidad de respuesta y preparación, en todos los niveles involucrados desde la comunidad

hasta las autoridades locales y nacionales” (EWC, 2017). “Un SAT para avenidas torrenciales debe contar con los mismos elementos y alcances de un SAT para cualquier otra amenaza de origen socio natural, sin embargo, debido a las particularidades y características de los eventos de las avenidas torrenciales, como es el caso de su corta duración, que van desde escalas temporales entre pocas horas o minutos, resulta fundamental fortalecer y garantizar la efectiva operatividad y resiliencia de todos los componentes del SAT, como es el caso de la optimización de los procesos de pronóstico, monitoreo y determinación de los umbrales de alerta de los eventos de avenida torrencial, para que brinden resultados en el menor tiempo y con la mejor precisión posible sumado a utilizar los mejores medios para la comunicación de la alerta, mejorar la efectividad y cobertura de los planes de respuesta y atención a emergencias” (Pontificia Universidad Javeriana, 2018).

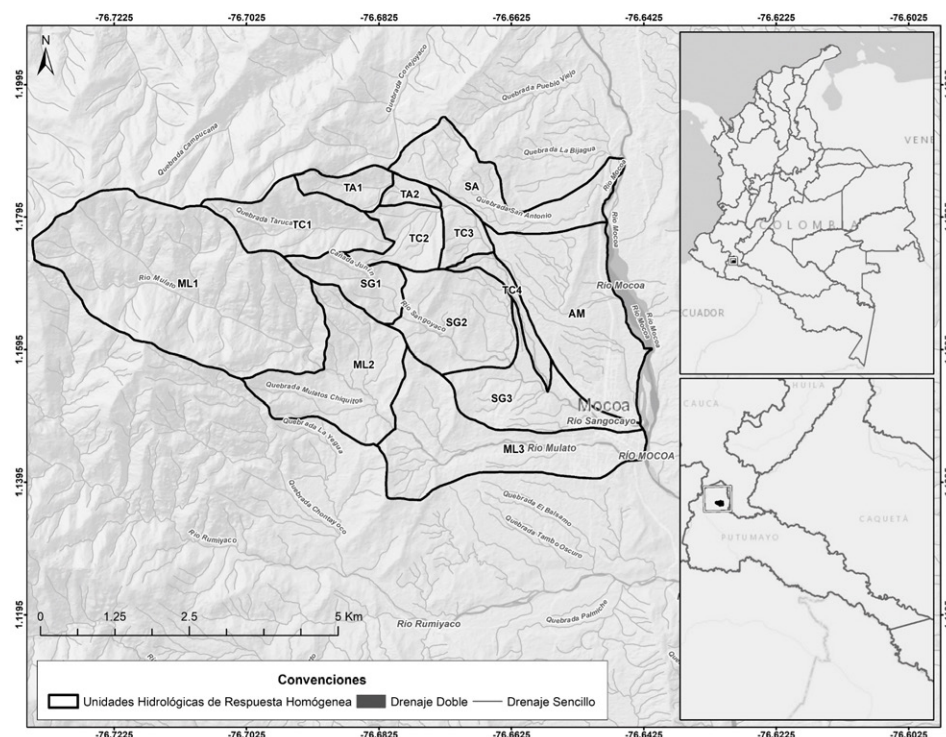


Figura 1. Localización de la zona de estudio y sus subcuencas

Fuente: Autores, 2023.

Nota: TA= Quebrada Taruca, TC= Quebrada Taruquita, SA= Quebrada San Antonio, SG= Río San Goyaco, ML= Río Mulato.

El presente trabajo se concentra en el componente 2 de un SAT. En este documento se presenta la metodología utilizada para determinar los umbrales para el sistema de alerta temprana (SAT) por avenidas torrenciales de la cuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco y las quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, Putumayo (ver Figura 1).

Se determinaron umbrales en función de diferentes variables que influyen en la generación de flujo de material desagregado con lo que se obtuvieron niveles de alerta para precipitación del aguacero, para intensidad-duración del aguacero, para precipitación acumulada de 4 días antecedentes al aguacero y caudal-nivel en los cauces. Se hace énfasis en la necesidad que el SAT funcione en términos de diferentes variables físicas dado el alto nivel de incertidumbre que existe tanto en los procesos de modelación (incertidumbre epistémica) como en la información base (incertidumbre aleatoria) que alimenta dichos modelos. Que el SAT cambie de nivel en función de diferentes variables hace que este sea redundante y que sea necesario tomar decisiones antes de emitir alerta a la comunidad. La redundancia del SAT es necesaria para procesos complejos como una avenida torrencial, dado la interrelación entre diferentes eventos físicos que hace que tenga potencial de daño. Los procesos físicos son: la precipitación en la parte alta de la cuenca que se puede infiltrar en los taludes causando aumento en las presiones de poros y a su vez disminución de la resistencia al corte de los taludes y posterior falla. Una vez fallan los taludes de las laderas, se moviliza dicho material al cauce generando un incremento en la energía del flujo. Adicionalmente, la escorrentía que viene de la precipitación termina en el cauce incrementando los volúmenes de material que tiene posibilidad de depositarse en la parte media y baja de la cuenca ocasionando

daño en la vida, bienes e infraestructura de la comunidad expuesta y vulnerable. Por primera vez se presenta que los umbrales para un SAT de avenidas torrenciales en Colombia provienen de un análisis físico integrado de los procesos, articulado con análisis probabilistas de la información disponible.

METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE LOS UMBRALES

Se determinaron umbrales de precipitación, de nivel y de caudal con base en la modelación basada en la física de un escenario de avenida torrencial de mayor magnitud a la del 31 de marzo de 2017 y su afectación a viviendas cercanas al cauce denominadas secciones críticas. Por otro lado, se determinaron umbrales de intensidad – duración y precipitación acumulada que generan deslizamientos, con base en dos eventos torrenciales ocurridos en Mocoa y la revisión de más de 80 umbrales de lluvia que generan deslizamientos reportados en la literatura. La recopilación de los umbrales de lluvia que generan deslizamiento fueron publicados por Ramos, Trujillo-Vela y Prada (2015) y se seleccionaron aquellos umbrales de intensidad – duración y precipitación acumulada que habían sido derivados para zonas climáticas intertropicales. A continuación, se describe la metodología utilizada para la generación de cada uno de estos umbrales.

Herramienta de modelación fluido-dinámica

Las herramientas de modelación empleadas para este trabajo hacen uso de las ecuaciones de aguas someras (Kundu & Cohen, 2004), las cuales permiten representar de forma bidimensional, la dinámica de las avenidas torrenciales. Adicionalmente, en estas ecuaciones se hace uso de parametrizaciones para representar las características mecánicas de la mezcla de agua, lodo, rocas que puede tener un flujo hiperconcentrado.

Para poder hacer las simulaciones se emplean como insumos básicos el modelo de elevación del terreno (DEM), el cual fue ajustado con mediciones en campo, y datos de caudal en la parte alta de la cuenca, con el fin de emplearlos como condiciones de contorno para simular los diferentes escenarios analizados (Pontificia Universidad Javeriana, 2018). En total se ejecutaron 20 escenarios, en los cuales se simularon 10 eventos de mayor magnitud al evento registrado el 31 de marzo de 2017, el evento en cuestión, y 9 eventos de menor magnitud. Lo anterior con el fin de tener un espectro de posibilidades para poder construir los umbrales del Sistema de Alertas Tempranas.

Dichas simulaciones fueron complementadas con la implementación de un modelo numérico que permite evaluar la estabilidad de los taludes considerando el cambio en la presión de poros debida a la infiltración causada por los diferentes escenarios de precipitación (Prieto Ch, Prada-Sarmiento, & Ramos C, 2020) A partir de este modelo se obtuvieron los correspondientes volúmenes aportados por los deslizamientos.

La calibración del modelo se realizó con los datos existentes y levantados para el evento del 31 de marzo de 2017. Dentro de la información secundaria usada para la calibración del modelo hidrológico, geotécnico y fluidodinámico se encuentra: a. la mancha de inundación que dejó el evento del 31 de marzo de 2017 levantado por el Servicio Geológico Colombiano, plasmado por García et al. (2017). b. las alturas de detritos que dejó el evento en diferentes edificaciones en el casco urbano de Mocoa. c. las cicatrices de deslizamiento que dejaron los procesos de remoción en masa en la parte alta de la Quebrada Taruca y Taruquita debido a las lluvias antecedentes. d. los registros de precipitación en la zona de influencia de la avenida torrencial.

Determinación de secciones críticas

La determinación de las secciones críticas en los cauces fue realizada inicialmente a partir de los resultados de las modelaciones fluido-dinámicas, que indicaban la parte de la zona urbana más vulnerable ante una avenida torrencial.

Los resultados de la modelación bajo condiciones de precipitación asociadas a un volumen de deslizamiento mayor al estimado para el evento del 31/03/17 se presentan en la Figura 2. Se puede observar que las mayores profundidades de flujo se presentan en la parte alta de la quebrada Taruca y del río Sangoyaco y que, bajo condiciones de precipitación desfavorables, los barrios que se verían afectados por un flujo de lodos y/o detritos se podrían agrupar en cuatro áreas principales:

1. Zona ubicada en la margen izquierda de la quebrada Taruca en la parte norte del municipio, comprendida por los barrios Altos del bosque, Jose E. Muñoz y los Pinos, presentando alturas de flujo de incluso 10m

2. Área ubicada en las cercanías de la desembocadura de la quebrada Taruca en el río Sangoyaco, que comprende los barrios Laureles, San Miguel, San Fernando y Urb. Nuevo Horizonte, con alturas de flujo de hasta 3m
3. Zona comprendida por los barrios El Carmen, la Reserva, Condominio norte y urb. Normandía, que a pesar de estar lejos de la quebrada Taruca, se encuentran en una zona donde drenan una serie de quebradas y por donde puede desviarse parte del flujo de la quebrada Taruca en caso de transportar volúmenes grandes, se observan allí alturas de flujo de menores a 1m y en algunas partes de hasta 3m
4. Área localizada en las cercanías de la desembocadura del río Sangoyaco en el río Mocoa, que comprende principalmente los barrios La Independencia y San Agustín. Se observan igualmente alturas de flujo elevadas en zonas alejadas de la zona urbana como en la vereda San Antonio, especialmente en las cercanías de la Urb. Altos de Junín, así como en el salto de la quebrada Taruca hacia la quebrada San Antonio.

Tras la revisión del perfil del terreno en esas zonas, se identificaron las viviendas más cercanas al cauce y allí las secciones críticas. Estas secciones son presentadas en la Figura 3 y se considera que en ellas se presentaría inundación aún con los caudales más bajos.

Para cada una de las secciones críticas se generó el perfil topográfico en donde se observa la variación de altura y la ubicación de las casas con menor cota. Las curvas de calibración de cada una de estas secciones y las cotas de las edificaciones más cercanas al cauce, fueron empleadas para estimar el caudal de la inundación en la sección, que posteriormente sería empleado para establecer niveles de alerta en los sensores de nivel instalados en la zona. En estas secciones se instaló un sensor de medición de nivel automático que transmite la información al centro de control localizado en las instalaciones de la policía en el casco urbano de Mocoa.

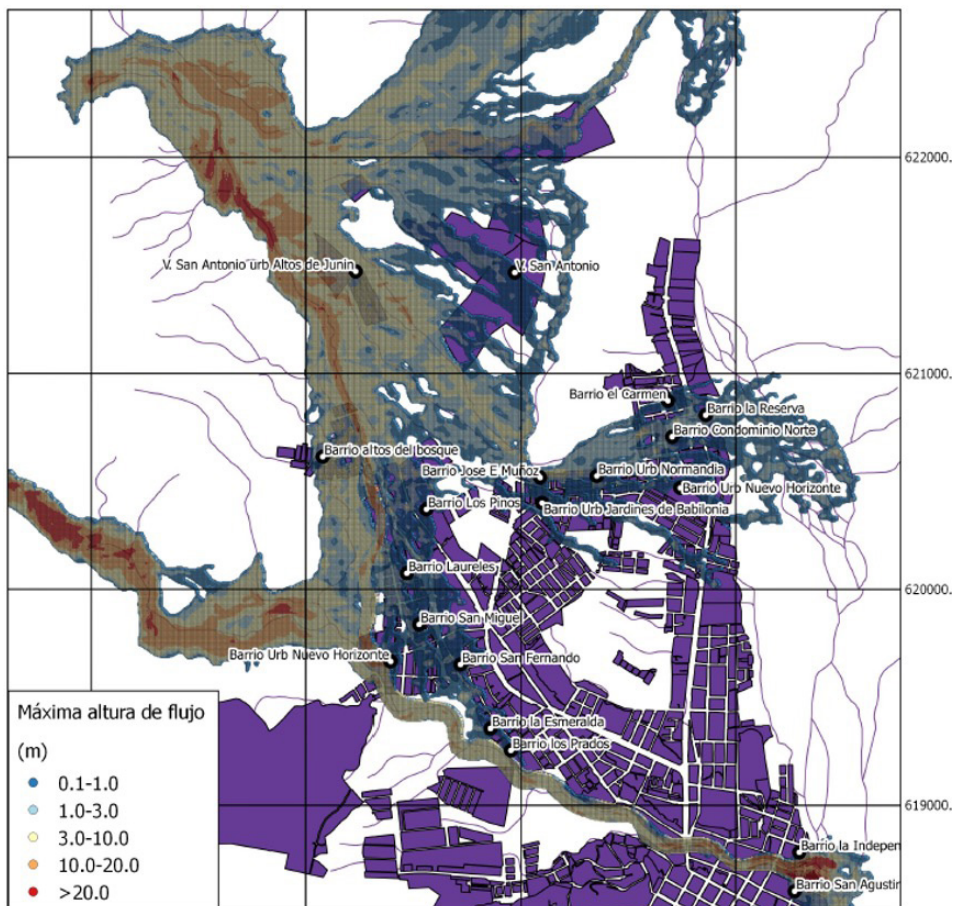


Figura 2. Máxima altura de flujo para escenario de precipitación asociada a un volumen de deslizamiento mayor al estimado para el evento del 31/03/17

Fuente: Autores, 2023.

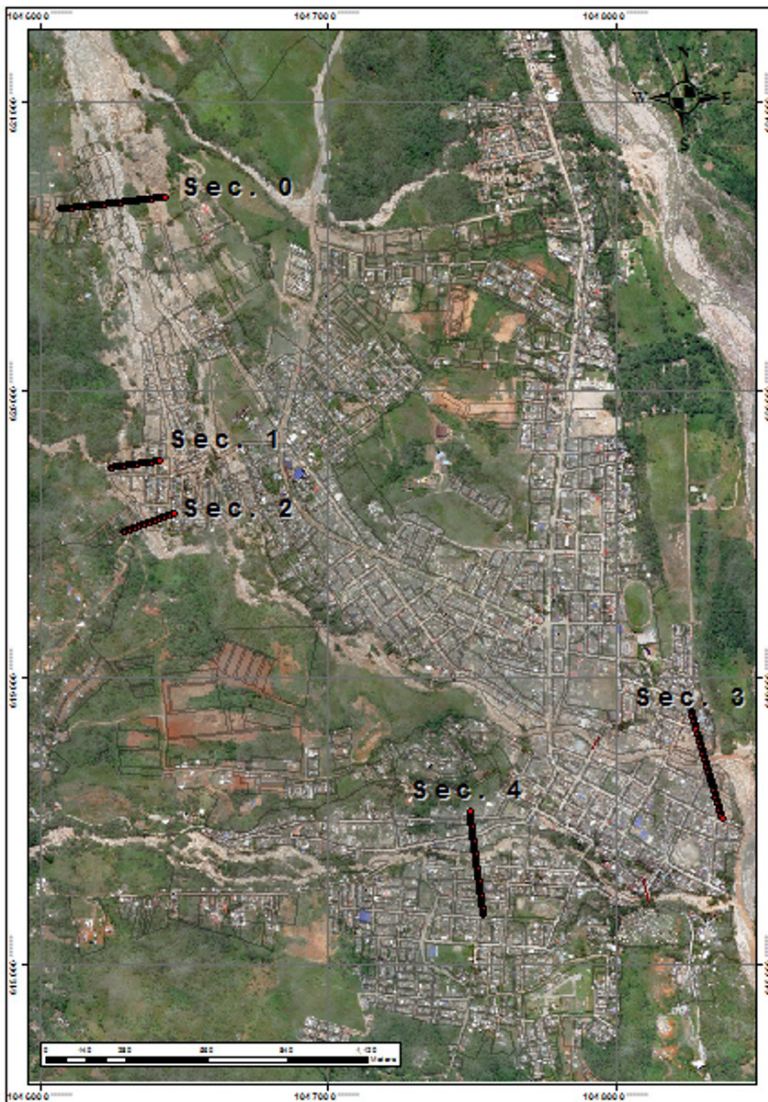


Figura 3. Ubicación geográfica secciones críticas seleccionadas
Fuente: Autores, 2023.

Determinación de umbrales de precipitación del aguacero

Los umbrales de precipitación fueron evaluados con la metodología FFG (Flash Flood Guidance) establecida por la NOAA (2010). En la metodología FFG se denomina umbral pluviométrico a la precipitación acumulada que genera un caudal o escorrentía con el que se desborda una determinada sección hidráulica (NOAA, 2010) (Rogelis, 2009). El valor que toma el umbral de precipitación depende de las características geográficas e hidrológicas de la cuenca y del canal del río.

Para la definición de los umbrales de precipitación se tuvo en cuenta la variación de humedad inicial en el suelo antes de un evento de precipitación, debido a que ésta cambia continuamente dependiendo de los procesos de pérdidas (evapotranspiración, escorrentía y percolación hacia suelos profundos o un acuífero) y ganancias (precipitación y el deshielo) de agua en la cuenca, generando así mayor o menor escorrentía dependiendo del estado en el que se encuentre (NOAA, 2010). En vista de que en el área de estudio no se contó con registros de humedad en el suelo, se determinó esta variable mediante el GR4J (modelo lluvia-escorrentía), calibrado para la cuenca vecina Piedra Lisa II, dada su similitud con la cuenca objeto de estudio.

Se consideró una distribución homogénea de la precipitación a lo largo de todas las unidades de respuesta hidrológica. Para saber cómo se distribuye la lluvia en los diferentes escenarios, se realizó un análisis de la precipitación en Mocoa, tomando como información base los registros de precipitación de la estación automática Mocoa Acueducto a una resolución de 10 minutos desde

el 2015 al 2017. El análisis de la lluvia se llevó a cabo mediante el análisis con las curvas de Huff (Bonta, 2004) quien sugiere una familia de curvas adimensionales con patrones temporales de tormentas basado en datos de cuencas del medio oeste de USA (Luna Vera, 2013). Los eventos de lluvias analizados se dividieron en cuatro grupos, de acuerdo con la fracción de intervalo de tiempo en el cual se presentaba la máxima intensidad de lluvia: en el primer, segundo, tercer o cuarto cuartil o intervalos de la duración de la tormenta. El segundo cuartil representa las duraciones de eventos de precipitación característica para Mocoa y de acuerdo con Huff la probabilidad de ocurrencia de los patrones de tormentas para este caso corresponde al 90%. Se tomaron duraciones de lluvia entre 60 y 360 minutos cada 30 minutos, distribuidas en el hietotipo obtenido con el análisis de Huff, con cantidades de lluvia que varían de 5 en 5 mm hasta 200 mm.

Se consideró que la cuenca puede encontrarse en una condición seca, media y saturada, debido a que las condiciones climáticas pueden fluctuar de manera que se presenten lluvias muy prolongadas o intensas, como también días sin precipitación, lo cual hace que varíe el contenido de humedad, el nivel freático, la recarga del acuífero, entre otras variables. Con el propósito de representar estas condiciones físicas en el modelo se tomaron los cuantiles 0.15, 0.5 y 0.95 de los caudales simulados para la cuenca para la condición seca, media y saturada, respectivamente. Finalmente se seleccionó el máximo caudal presentado por condición y se realizó la simulación para el día antecedente al cual se generó dicho caudal, obteniendo como resultado de la simulación las variables de estado para cada una de las condiciones antecedentes analizadas.

El hietotipo planteado se introdujo en el modelo hidrológico, de acuerdo con las condiciones iniciales del modelo descritas anteriormente. Para cada una de las evaluaciones se extrajo el caudal máximo alcanzado en una intensidad y duración específica. Con base en la metodología FFG, se trazaron curvas de precipitación vs escorrentía para el área en estudio para diferentes concentraciones volumétricas. Posteriormente teniendo en cuenta las secciones críticas y las capacidades hidráulicas de cada una de las secciones identificadas se generaron los umbrales de precipitación, resolviendo la relación inversa de la relación lluvia-escorrentía de la cuenca.

A partir de las curvas de calibración y de la estimación de los caudales para las secciones críticas, se trazaron los umbrales para los diferentes niveles de alerta (amarillo, naranja y rojo). Los umbrales de precipitación se determinan a través del proceso inverso de la relación lluvia-escorrentía de la cuenca, donde se conoce el caudal correspondiente a la alerta y se identifican los diferentes escenarios de precipitación que podrían generar dicho caudal. Los escenarios de precipitación identificados, asociados a cada nivel de alerta se presentan en la Figura 4. Esta es la primera aproximación desde la física que se realiza cuando se aborda el problema desde una mirada de inundación de agua sin sedimentos. Estos umbrales abordan el problema de precipitación significativa que directamente aumenta los caudales por lo que empieza a ser relevante cuando el tiempo en que se acumula es mayor a una hora. En este punto es relevante mencionar que dada la cantidad limitada de información de precipitación a nivel horario, los resultados tienen un nivel importante de incertidumbre epistémica. Sin embargo, es claro que el análisis probabilístico que se realizó a la información de precipitación refleja su carácter aleatorio, siendo este camino (el probabilismo) de las mejores herramientas que tiene la humanidad para enfrentar el problema. Los umbrales para el sistema de alerta temprana que se propusieron en términos de precipitación son probabilísticos reflejando su verdadera naturaleza alejada del determinismo. En dado caso que se hubiera tenido un cubrimiento mayor temporal de precipitación horaria para el modelo, la propuesta metodológica presentada en este estudio se aplicaría de la misma manera, con la diferencia que la incertidumbre epistémica tendería a disminuir, sin embargo, la incertidumbre aleatoria siempre está presente por lo que el abordaje probabilístico seguiría siendo el más adecuado.

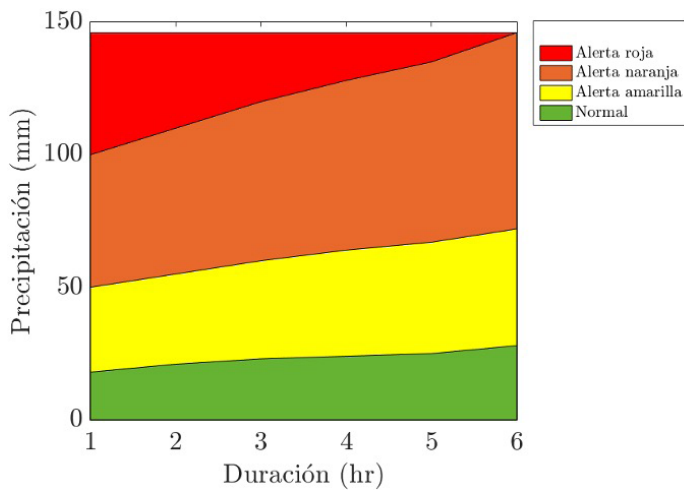


Figura 4. Umbrales de precipitación del aguacero
Fuente: Autores, 2023.

Determinación de umbrales de caudal – nivel

Los umbrales de nivel corresponden a niveles de flujo que permiten emitir advertencias y alertas de inundación en ciertos puntos del cauce. Teniendo en cuenta los resultados de las modelaciones fluidodinámicas de diferentes escenarios de precipitación y las secciones críticas determinadas, se calcularon la serie de caudales con los que se inundan cada una de las secciones. Con estos caudales, se establecieron niveles de alerta en las secciones transversales donde se ubican actualmente los sensores de nivel (ver Figura 5). A partir del nivel determinado para cada sensor, se establecieron niveles de alerta amarilla, naranja y roja como un porcentaje de dicho nivel de inundación. Los porcentajes para cada alerta correspondieron a 25, 50 y 70.

Los umbrales de caudal propuestos para las tres alertas en cada sensor, son presentados en la Tabla 1. A manera de ejemplo se presenta en la Figura 6 el umbral de nivel de la sección donde está en sensor B.

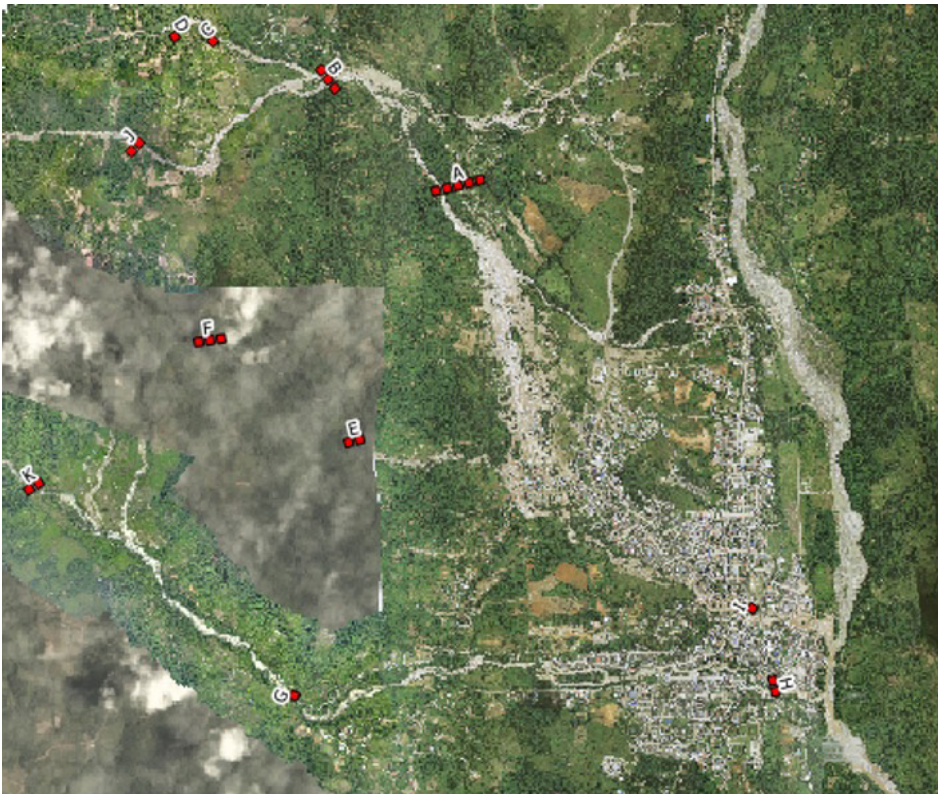


Figura 5. Esquema de localización sensores de nivel del SAT
Fuente: Autores, 2023.

	Amarilla	Naranja	Roja
Sensor A	35.99	161.36	323.6
Sensor B	35.50	172.51	375.1
Sensor C	23.11	100.37	329.30
Sensor D	33.37	122.23	348.64
Sensor E	24.17	109.93	229.33
Sensor F	48.08	155.05	273.72
Sensor G	11.20	60.66	218.44
Sensor H	10.90	70.30	206.9
Sensor I	23.2	131.36	323.6
Sensor J	24.83	68.8	171.1
Sensor K	71.21	112.6	157.83

Tabla 1. Umbrales propuestos de caudal para cada sensor de nivel instalado en m³/s
Fuente: Autores, 2023.

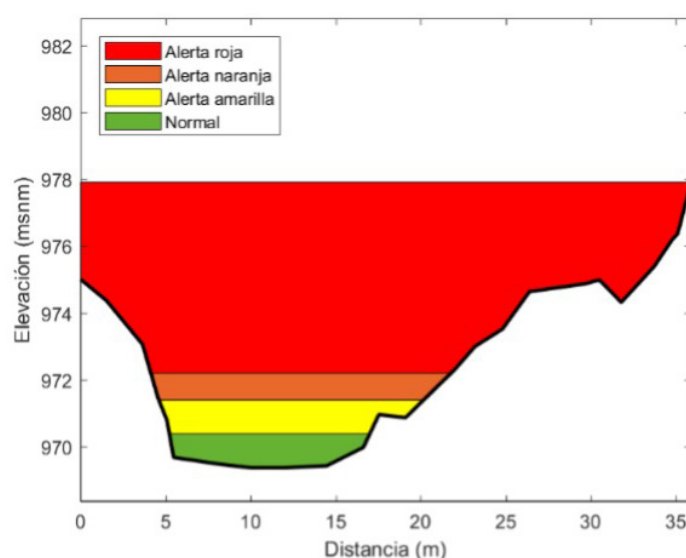


Figura 6. Umbrales de nivel del sensor B
Fuente: Autores, 2023.

Determinación umbrales de intensidad – duración del aguacero que generan deslizamientos

Para la determinación de umbrales de lluvia que generan deslizamientos se utilizaron las relaciones intensidad-duración reportadas en la base de datos consolidada por Ramos et. al. (2015) y las curvas intensidad – duración características de las avenidas torrenciales ocurridas en marzo y agosto de 2017.

Se utilizaron 87 umbrales de lluvia que generan deslizamientos recopilados de la bibliografía por Ramos et. al. (2015) y se compararon con las curvas intensidad – duración características de los eventos del 31 de marzo y del 31 de agosto de 2017. Se observó que las curvas características de intensidad – duración de los días de los eventos en Mocoa se ubicaron en la parte superior del conjunto de umbrales de la bibliografía, de lo que se concluyó que efectivamente las intensidades y duraciones ocurridas en esas fechas representaban magnitudes altas, especialmente las del 31 de marzo de 2017 en donde se conoce que ocurrieron alrededor de 276 deslizamientos (García et al. 2017).

El siguiente paso para la determinación de umbrales de lluvia que generan deslizamientos en Mocoa fue determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. Para este análisis se utilizó la totalidad de los umbrales intensidad – duración reportados en la bibliografía recopilados por Ramos et. al. (2015). Se observó que la curva característica de intensidad-duración del evento

del 31 de marzo se ubica entre el 70% y el 100% de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y que se conoce que esas condiciones de lluvia generaron deslizamientos que aportaron sedimentos al flujo de detritos, los niveles de alerta fueron propuestos en función de dichas probabilidades de ocurrencia de deslizamientos.

En la Figura 7 se presentan los niveles de alerta para la intensidad dada una duración, que generan deslizamientos en las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita y ríos Mulato y Sangoyaco. La franja roja representa probabilidades de ocurrencia de deslizamiento mayores al 70% similares a las del evento del 31 de marzo, la franja naranja se encuentra entre el 50% y 70% de probabilidad, la franja amarilla corresponde a probabilidades entre 40% y 50% y finalmente la franja verde representa las condiciones normales de los cauces con probabilidades de ocurrencia de deslizamientos menores al 40%.

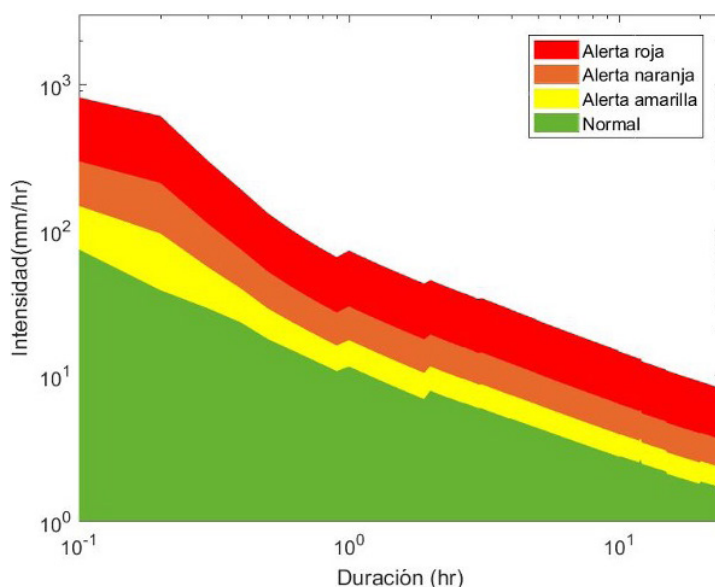


Figura 7. Umbrales intensidad- duración del aguacero que generan deslizamientos
Fuente: Autores, 2023.

Determinación de umbrales de precipitación acumulada de 4 días que generan deslizamientos

Ramos et. al. (2015) reportan que el segundo parámetro de lluvia más usado como umbral para la generación de deslizamientos es la lluvia acumulada antecedente de varios días, esto dado que es un parámetro conveniente cuando la escala de medición de lluvia en las estaciones no es horaria o subhoraria como para utilizar el parámetro de intensidad – duración.

Para el análisis de la influencia de la precipitación antecedente en la ocurrencia de deslizamientos, se acumuló la precipitación durante 30 días antecedentes partiendo del 31 de marzo de 2017, adicionalmente se acumuló la precipitación de 30 días antecedentes partiendo de las fechas anteriores al 31 de marzo con el fin de tener gran cantidad de eventos que representaran el espacio muestral conveniente para el cálculo de probabilidades.

Una vez se obtuvieron los eventos que representan el espacio muestral, se procedió a calcular la probabilidad de que no se excediera la precipitación antecedente del 31 de marzo de 2017 dado un número de días antecedentes de acumulación. Se observó que durante los primeros 4 días de acumulación, la probabilidad de no exceder la precipitación acumulada del 31 de marzo era muy cercana a 1, lo que quiere decir que esa acumulación de lluvia en 4 días fue una de las más altas que se ha presentado para la zona.

Los resultados mostraron claramente que la lluvia antecedente es uno de los factores extrínsecos que generan procesos de remoción en masa en la parte alta de las quebradas La Taruca y La Taruquita. Además, se observó que dichos procesos se asocian hasta con cuatro días antecedentes de precipitación dada las altas probabilidades de no excedencia.

Nuevamente los niveles de alerta fueron propuestos en función de las probabilidades de ocurrencia de deslizamientos. La Figura 8 representa entonces los niveles de alerta de procesos

de movimientos en masa dada una precipitación antecedente acumulada de cuatro días para la cuenca de las quebradas Taruca y Taruquita y los ríos Sangoyaco y Mulato.

En la Figura 8 la franja roja corresponde a probabilidades mayores al 70%, la franja naranja se encuentra entre el 40% y el 70% de probabilidad, la franja amarilla representa probabilidades entre 20% y 40% y la franja verde corresponde a condiciones de precipitación con probabilidades menores al 20% de generar procesos de remoción en masa.

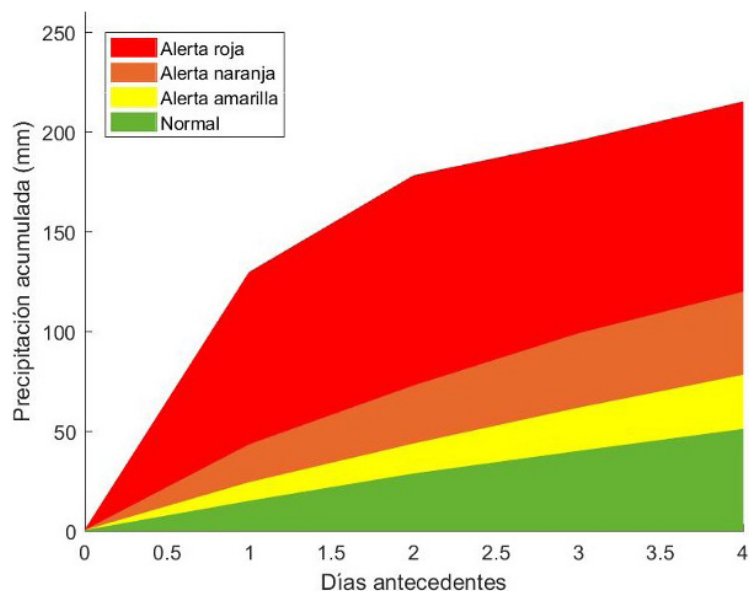


Figura 8. Umbrales de precipitación acumulada de 4 días antecedentes que genera deslizamientos
Fuente: Autores, 2023.

RESULTADOS DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Las reglas de operación del sistema de alerta temprana que involucran todos los niveles de alerta propuestos siguen el siguiente procedimiento:

De acuerdo con la propuesta del diseño del sistema de alerta temprana, en la parte alta, media y baja de la cuenca se cuenta con 4 estaciones meteorológicas que entregan información de precipitación. A partir de esta información se utiliza la Figura 4 para conocer el nivel de alerta que representa la precipitación del aguacero.

En este paso se deben utilizar los umbrales de lluvia propuestos para la generación de deslizamientos en función de dos variables influyentes, teniendo en cuenta que los deslizamientos en la parte alta de las quebradas Taruca y Taruquita aportaron parte de los sedimentos que generaron las concentraciones volumétricas del flujo de detritos ocurrido el pasado 31 de marzo de 2017. A partir del registro de precipitación del aguacero se calcula la intensidad y duración del mismo y por medio de la Figura 7 se encuentra el nivel de alerta que representa el valor de la intensidad de la lluvia de acuerdo con su duración.

Se revisa el registro de la lluvia acumulada de 4 días antecedentes al aguacero, información con la cual se ingresa a la Figura 8 y se obtiene el nivel de alerta que representa la precipitación acumulada.

Se revisan los registros de niveles en todos los sensores propuestos para el SAT y de acuerdo con los umbrales de caudal y nivel propuestos en el numeral 2.3 se selecciona el nivel de alerta más crítico registrado en los 11 sensores. De este paso se obtiene entonces el nivel de alerta correspondiente a caudal-nivel en los diferentes sensores.

Finalmente, se propone comparar todos los niveles de alerta y designar aquel que es mayor. La regla de operación es tan simple como el denominado "Worst Case Scenario" dada la incertidumbre presente tanto en los modelos como en la información base utilizada para los umbrales probabilísticos de generación de deslizamientos por lluvias acumuladas o relación intensidad-duración.

La prueba de funcionamiento de este sistema de alerta se evidenció en agosto de 2018, día en que se volvió a presentar una avenida torrencial de considerable magnitud. En ese sentido, el Sistema de Alerta Temprana fue implementado y puesto en marcha a comienzos de 2018 y el evento se volvió a presentar el 12 de agosto de 2018. El SAT logró generar una alerta de evacuación para alrededor de 18000 habitantes de Mocoa, sin que se presentaran fallecidos o heridos. Hubo pérdida de sensores durante el evento, lo que se llama la pérdida aceptable.

DISCUSIÓN

Hidrológicamente la cuenca delimitada para Mocoa es considerada una cuenca no instrumentada, lo cual obliga al modelador a crear un marco hipotético del comportamiento hidrológico que va desde la selección de cuencas cercanas con posibilidad de comportamiento análogo, la elección de un modelo hidrológico, la parametrización del mismo y la delimitación del alcance del modelo. En este orden de ideas, la exploración del comportamiento hidrológico se basó en el estudio de cuencas vecinas, seleccionando la cuenca Piedra Lisa II. Sin embargo, en la medida en la que se vayan teniendo datos de las estaciones hidrometeorológicas del SAT, los umbrales pueden ser actualizados como parte de las actividades del mantenimiento y operación de este sistema.

La sensibilidad de la respuesta de los diferentes modelos a la representación de la topografía y la capacidad de los modelos de reproducir la realidad está limitada a la fidelidad del modelo de elevación digital empleado con la topografía actual. Los cambios que puedan sufrir los cauces bien sean por causas naturales o por acción antrópica perturbarán la respuesta del cauce. Por lo anterior, los umbrales determinados para el SAT actual corresponden a las condiciones actuales del territorio, pero en la medida en que se vayan haciendo modificaciones, especialmente en el caso de construcción de medidas de reducción, se tendrán que recalibrar los umbrales. Es muy importante resaltar la importancia de una cuidadosa gestión, mantenimiento y actualización del SAT en la medida en la que se hagan cambios en los cauces, porque la presencia de un sistema de alerta puede inducir una sensación de seguridad, que es justificada solo si se garantiza una adecuada y continua operación del sistema dadas las condiciones para las cuales se diseñó.

Por otro lado, la eficacia en la capacidad de respuesta de la población frente a la comunicación de alertas y emergencias tanto en los simulacros como en los fenómenos reales debe ser estudiada y evaluada continuamente para corregir los posibles fallos en aspectos como la comunicación de la alerta, la capacidad de respuesta o el desarrollo de la evacuación. A través de estas evaluaciones se puede medir el tiempo que se requiere para la evacuación de la población y comparar con el tiempo de aviso que entrega el SAT, identificar y corregir las carencias y captar las mejores prácticas.

Se hace énfasis en la necesidad de que el SAT funcione en términos de diferentes variables físicas dado el alto nivel de incertidumbre que existe tanto en los procesos de modelación hidrológica, geotécnica, hidráulica (incertidumbre epistémica) como en la información base de precipitación, caudales, propiedades de los materiales (incertidumbre aleatoria) que alimenta dichos modelos. Que el SAT cambie de nivel en función de diferentes variables hace que este sea redundante y que sea necesario tomar decisiones antes de emitir alerta a la comunidad. Dado que los umbrales están definidos en términos de diferentes variables hidrometeorológicas puede generar diferentes alertas aparentemente contradictorias entre sí, sin embargo, reflejan una posible realidad. Por ejemplo, que se siga la variable intensidad duración de precipitación y esté en nivel rojo, pero la variable caudal esté en verde. La redundancia del SAT es necesario para amenazas tan complejas como una avenida torrencial, dada la interrelación entre diferentes eventos físicos que hace que tenga potencial de daño. La posibilidad de generar las alertas con umbrales de diferentes variables hace que sea posible abarcar procesos tan diversos como represamiento en la parte alta de la cuenca por generación de deslizamientos que acumule sólidos y posterior rompimiento de la presa con transporte de gran cantidad de sólidos y agua. En este caso, los caudales y niveles en la parte baja de la cuenca son bajos, por lo que el nivel de la alerta temprana puede ser verde, pero los umbrales generados a partir de las precipitaciones (intensidad – duración o precipitación acumulada) que generan deslizamiento en la parte alta de la cuenca están en rojo dado que se presentaron procesos de remoción en masa que represaron el cauce.

CONCLUSIONES

Los diferentes umbrales desarrollados para el SAT contra avenidas torrenciales de Mocoa (Putumayo-Colombia) se plantean de manera tal que las variables hidrometeorológicas puedan ser seguidas en tiempo real con instrumentación disponible y ser comparadas para ver cómo cambian los niveles de alerta en el tiempo. A medida que el SAT esté en operación y se consiga información, puede analizarse el desempeño del SAT y cuantificar la incertidumbre que tienen los procedimientos propuestos. Este proceso continuo garantizará que el SAT se mantenga actualizado, bajo una gestión dinámica del riesgo, permitiendo un mejor desempeño en futuros eventos.

La regla de operación para la comunicación de la alerta a la comunidad se basa en seleccionar de todos los niveles de alerta, el más conservador, que en términos prácticos es el denominado "Worst Case Scenario". Este tipo de decisión puede hacerse cuando la incertidumbre es importante para la toma de decisión y no existe la información o no es suficiente para poder cuantificar la incertidumbre del proceso. Se espera que, con el paso del tiempo, se pueda obtener datos que alimentan el SAT y de esta manera hacer análisis que permita cuantificar la incertidumbre en todos los umbrales propuestos y consecuentemente analizar su desempeño.

Este tipo de estudios continúan siendo claves para el desarrollo de buenos Sistemas de Alerta Temprana para cumplir uno de los cometidos de la Gestión del Riesgo de Desastres que es salvar vidas y proteger los bienes públicos; y, es en lo que menos se invierte dado, que usualmente el enfoque se queda en la instalación de equipos de monitoreo y de alerta pero sin la certeza de los umbrales que finalmente son el punto de partida de un buen sistema de monitoreo y de sistemas de alerta temprana, por tanto, continúa siendo un reto para el país invertir en estos temas, ya que cada cuenca tiene su propio comportamiento y requiere del análisis.

Por primera vez se presenta umbrales para un SAT de avenidas torrenciales en Colombia provenientes de un análisis físico integrando los procesos y a su vez articulado con análisis probabilistas de la información disponible. Es decir, es claro que en cada uno de los componentes del proceso de propuesta de niveles umbrales para el SAT se tiene incertidumbre, por lo que lo más conveniente es que en lo posible, los umbrales para pasar en los diferentes niveles de alerta sean probabilísticos y no determinísticos. Los umbrales de precipitación caudal y niveles (Figuras 4 y 6) provienen de un análisis físico del problema, sin embargo, los umbrales que generan deslizamientos (Figura 7 y 8) provienen de un análisis probabilístico. En estos últimos casos, los niveles de alerta indican además una probabilidad de ocurrencia de deslizamiento dada la magnitud de la precipitación.

El modelo hidrológico se encuentra acoplado con el modelo geotécnico de manera tal que la tasa de infiltración espacializada celda a celda es capaz de modificar el perfil de presión de poros en la zona saturada y no saturada. La variación del perfil de presión de poros afecta el modelo de estabilidad de taludes para obtener variaciones del factor de seguridad de las laderas en el tiempo y consecuentemente los volúmenes de sólidos que se generan con las precipitaciones. El modelo de estabilidad de taludes articulado con la infiltración es el que está incorporado en el software TRIGRS del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Baum, Savage & Godt, 2008). El modelo de infiltración necesita de parámetros que fueron obtenidos de estudios geomorfológicos, agrológicos y edafológicos (permeabilidad, contenido saturado de agua, contenido residual de agua, conductividad hidráulica saturada, difusividad hidráulica). La mayor parte de los parámetros mencionados se obtuvo a partir de estudios a escala 1:25000 y menor, con validaciones puntuales de campo. Dado que el área de estudio es amplia, no era posible determinar con base en ensayos de campo de manera puntual los parámetros para la infiltración. Este aspecto es un limitante en cuanto a su representatividad espacial, sin embargo, dada la escala de estudio y el cubrimiento en área rural y urbana de Mocoa, se considera que el análisis de la información secundaria de agrología, edafología y geomorfología ayuda por un lado, a caracterizar el subsuelo y por otro lado, generar zonas de respuesta geotécnica homogénea frente a la generación de precipitaciones y la posibilidad de generar sólidos por deslizamientos que se incorporen en el modelo fluidodinámico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) por la financiación del proyecto y a las entidades del estado que brindaron información para su desarrollo como Corpoamazonía, IDEAM, IGAC, Servicio Geológico Colombiano, Alcaldía de Mocoa, Gobernación del Putumayo.

REFERENCIAS

- Baum, R.L., Savage, W.Z. & Godt, J.W. (2008). TRIGRS: a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, Version 2.0. USGS numbered series (Open-File Report). <https://doi.org/10.3133/ofr20081159>
- Bonta, J.V. (2004). Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts. *Am Soc Agric Eng*, 20(5), 641-654.
- EWC. (2017). *Multi-hazard early warning Conference*. EWC.
- García, H., Machuca, S., Medina, D., Rangel M., Sandoval, A., Morales, J., Barrera, L. Gamboa, C. & Medina E. (2017). *Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de marzo de 2017 en Mocoa – Putumayo*. SGC. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.18803.43045>
- Jojoa, O. (2003). *Análisis de vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana de la población de Mocoa, departamento del Putumayo*. Corpoamazonía.
- Kundu, P., & Cohen, I. (2004). *Fluid Mechanics*. Elsevier.
- Luna Vera, J. (2013). *Predicción y pronóstico de tormentas en regiones de Montaña - Aplicación en la cuenca del río La Paz, Bolivia*. Universidad Nacional Autónoma de México. www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/6012/1/tesis.pdf
- NOAA. (2010). *Flash flood early warning system reference guide*. NOAA.
- ONU. (2016). *Informe del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores y la terminología relacionadas con la reducción del riesgo de desastres (A/71/644)*. ONU.
- PMA-GCA. (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Serv. Nac. Geol. y Minería.
- Pontificia Universidad Javeriana. (2018). *Informe general de la consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa*. PUJ.
- Prieto Ch, A., Prada-Sarmiento, L., & Ramos C., A. (2020). Integrated Numerical Model to simulate the mass movements of the Mocoa event on March 31-2017. *SCG-XIII International Symposium on Landslides*.
- Ramos, C.A., Trujillo-Vela, M., & Prada S., L. (2015). Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras y Proy.*, 18, 63-75.
- Rogelis, M. (2009). *Actualización de la zonificación de amenaza de inundación y avenidas torrenciales de la Quebrada Limas - Localidad de Ciudad Bolívar*. FOPAE.
- Rojas, E., Fernández, J., & Páez, L. (2005). *Manual técnico del censo general*. DANE.
- Ruiz P., G., Medina B., E., Castro, E., Navarro, S., Sandoval, A., Machuca, S. et al. (2017). *Zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa de las subcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco del municipio de Mocoa, Escala 1:25000*. SGC.
- UNGRD. (2018). *Avenidas torrenciales, priorización para estudios de microcuencas*. UNGRD.