

## DESEMPEÑO TÉCNICO DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA AVENIDAS TORRENCIALES EN MOCOA, COLOMBIA

Alfonso Ramos-Cañón<sup>1,2\*</sup>, Luis F. Prada-Sarmiento<sup>3</sup>, Maddy Munévar-Peña<sup>1</sup> y Carolina Castro-Malaver<sup>4,5</sup>

### RESUMEN

La avenida torrencial (AVT) del 31 de marzo de 2017 en Mocoa (Colombia) causó 332 muertos, 398 heridos y 77 desaparecidos. En consecuencia, se diseñó e implementó un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para AVT. Este artículo presenta la evaluación del desempeño técnico del SAT mediante la comparación de sus umbrales con datos hidrometeorológicos registrados durante una AVT posterior, ocurrida el 12 de agosto de 2018. El SAT-Mocoa funciona mediante la combinación de varios umbrales definidos para las variables relevantes en la generación de AVTs. Los umbrales se establecieron a partir de la relación entre precipitación, caudal y movimientos en masa. La comparación de los registros mostró que las variables precipitación-movimientos en masa alcanzaron el nivel de alerta roja una hora antes del impacto en el casco urbano, mientras que las variables precipitación-caudal no superaron los umbrales requeridos para activar el plan de evacuación. En el evento del 2018, se evacuó a más de 20000 habitantes y se registraron 0 víctimas. La evaluación técnica resalta la necesidad de la redundancia en el SAT, dada la complejidad e incertidumbre en eventos AVTs, y destaca la importancia de la apropiación del conocimiento y la toma de decisiones articulada para una respuesta efectiva.

### PALABRAS CLAVES

Avenidas torrenciales; Sistema de alerta temprana; Umbrales de lluvia; Movimientos en masa; Evacuación; Víctimas; Colombia

### EARLY WARNING SYSTEM PERFORMANCE FOR DEBRIS FLOW IN MOCOA, COLOMBIA

#### ABSTRACT

On March 31, 2017, a devastating debris flow hit Mocoa, Colombia, resulting in 332 fatalities, 398 injured, and 77 individuals reported as missing. An early warning system (EWS) for debris flow was designed for Mocoa. This article focuses on evaluating the performance of a debris flow EWS by comparing its pre-defined thresholds with actual hydrometeorological data recorded during the debris flow event on August 12, 2018. The EWS of Mocoa operates based on a set of thresholds estimated for the variables relevant to the initiation of debris flow. The thresholds were defined based on the relationship between the rainfall, discharge and landslides. Analysis of the recorded data indicates that the rainfall-landslide interaction reached the red alert threshold approximately one hour prior to the event's impact on the populated area, whereas the rainfall-discharge variables did not exceed the threshold required to activate evacuation alerts. In the 2018 event, over 20,000 residents were evacuated, with no fatalities reported. The evaluation highlights the need for redundancy in the EWS, due to the complexity and uncertainty of debris flow events. The importance of knowledge appropriation and coordinated decision-making was also noted as key to the effectiveness of the emergency response.

#### KEYWORDS

Debris flow; Mudflow; Early warning system; Rainfall thresholds; Mass movements; Evacuation; Victims; Colombia

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

2. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

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

4. Department of Civil, Geological and Mining Engineering, Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.

5. LMGC, Université de Montpellier, Montpellier, Francia.

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

#### DOI:

<https://doi.org/10.55467/reder.v10i2.234>

#### RECIBIDO

12 de mayo de 2025

#### ACEPTADO

13 de febrero de 2026

#### PUBLICADO

1 de julio de 2026

#### Formato cita

#### Recomendada (APA):

Ramos-Cañón, A., Prada-Sarmiento, L.F., Munévar-Peña, M. & Castro-Malaver, C. (2026). Desempeño Técnico del Sistema de Alerta Temprana para Avenidas Torrenciales en Mocoa, Colombia *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 10(2), 301-312. <https://doi.org/10.55467/reder.v10i2.234>



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)*

## INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo de desastres por eventos de origen siconatural como las avenidas torrenciales, se compone de las acciones que se realizan antes (conocimiento y reducción del riesgo) y después (respuesta y recuperación) de la ocurrencia de un evento peligroso. El diseño de sistemas de alerta temprana (SAT) corresponde a las acciones de reducción del riesgo porque su objetivo principal es salvar vidas en eventos peligrosos (UNGRD, 2021). La implementación de los componentes de conocimiento y reducción del riesgo en países con recursos económicos limitados es un tema reciente, dado que en estos países los SAT suelen emplearse solo tras la ocurrencia de un evento catastrófico que deja en evidencia su necesidad. En este contexto, el diseño y la implementación del SAT se convierten en un reto científico porque la principal limitación es la información disponible y la incertidumbre asociada a ésta (Alfieri et al., 2012).

La metodología de diseño es transversal para todos los SAT para eventos siconaturales (Figura 1). Tanto para el conocimiento y análisis del riesgo, así como para el monitoreo y pronóstico de los eventos, suelen implementarse análisis provenientes de la ingeniería y de las geociencias (Figura 2). Las fases de construcción del sistema base, conceptualización, modelo matemático y aplicativos computacionales tienen asociada una incertidumbre que afecta considerablemente las fases de creación de escenarios, calibración y validación. Con el objetivo de reducir el impacto de la incertidumbre en las fases de salida, Ramos-Cañón et al (2023) proponen que los SAT para procesos complejos sean redundantes. La redundancia está asociada a la capacidad del SAT de generar diferentes niveles de alerta en función de distintas variables que representen los procesos físicos del evento peligroso en cuestión.

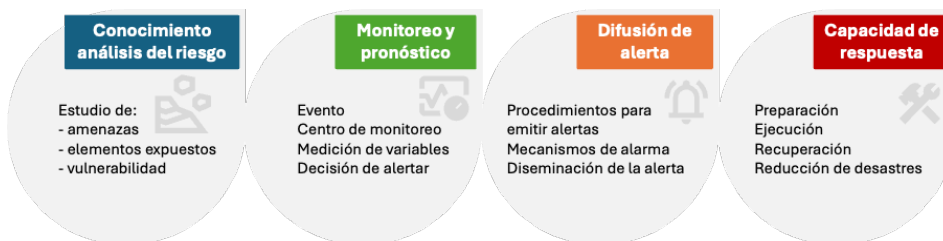


Figura 1. Componentes transversales en SAT para eventos socio-naturales  
Fuente: Autores, 2026, adaptado de Unidad para la gestión del Riesgo (2021).



Figura 2. Protocolo de modelación en ingeniería  
Fuente: Autores, 2026.

El concepto de avenida torrencial se refiere a un flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes, con pendientes longitudinales altas, que puede ser generado por efecto de lluvias intensas e involucra el transporte de una mezcla de agua y sólidos (suelos, rocas, detritos) en diferentes proporciones (Ramos-Cañón, et al., 2021). En los casos en los que se diseñan SAT para flujos de detritos o avenidas torrenciales, se deben considerar las variables que pueden detonar movimientos en masa y las condiciones de los cauces dentro de la zona de estudio. Usualmente, los movimientos en masa son detonados por precipitaciones o eventos sísmicos que cambian las condiciones de equilibrio dentro del talud y eventualmente, los sólidos provenientes de movimientos en masa son transportados por los cauces. La profundidad y la velocidad del agua en los cauces, junto con los detonantes, permitirán establecer umbrales que representen niveles de alerta de la ocurrencia de una avenida torrencial.

En la literatura se encuentran reportes de diversos autores que han abordado el diseño de un SAT para movimientos en masa a partir del análisis de la lluvia como detonante principal. Calvillo et al. (2014), Bacchini y Zannoni (2003) y Tiranti y Rabuffetti (2010) proponen SAT que permiten alertar sobre el detonante de una avenida torrencial, pero no abarcan en totalidad su complejidad (transporte, socavación y depósito). Para esto, Jakob et al, (2012) proponen un SAT para flujos

de detritos basado en un análisis discriminante de 20 variables hidrológicas de 63 tormentas que detonaron 27 eventos entre movimientos en masa y flujos de detritos. Las variables representativas fueron lluvia acumulada de 2 y 30 días, intensidad de lluvias y humedad del suelo. Por otro lado, Alfieri et al. (2012) encontraron que lluvias cortas e intensas son el detonante principal de flujos de detritos y que la duración de la lluvia está relacionada con el espesor del suelo movilizado. Ellos también proponen que la base de los SAT sea la combinación entre la susceptibilidad del suelo y mediciones o pronósticos de lluvias.

Arattano et Marchi (2008) clasifican los SAT para AVTs en dos grupos. Los SAT avanzados realizan el monitoreo continuo de las variables detonantes de eventos AVT y están diseñados para emitir una alerta lo más temprana posible. El segundo grupo, SAT de eventos, está diseñado para emitir la alerta ante una AVT mientras está ocurriendo el evento, lo que limita el tiempo de respuesta. Recientemente, Ramos-Cañón et al. (2023) diseñaron un SAT avanzado para avenidas torrenciales en el piedemonte andino amazónico (Mococa - Colombia) a partir de un análisis físico integrado y articulado con análisis probabilistas. Este SAT consideró umbrales para determinar el nivel de alerta en términos de la redundancia de las variables de precipitación, cota de nivel de agua y caudal (Ramos-Cañón, et al., 2023). El SAT de Mococa fue diseñado e implementado tras la ocurrencia del evento catastrófico del 2017 (Prada-Sarmiento, Cabrera, Camacho, Estrada, & Ramos-Cañón, 2019).

Diversas metodologías se han propuesto en la literatura para la evaluación del desempeño de los SAT. Por ejemplo, la medición de la confiabilidad del sistema con base en la probabilidad de detección de eventos (eventos detectados con base en el número de eventos ocurridos), la probabilidad de falsas alertas y la medición de la reducción del riesgo (Sattelle, Brundl, & Straub, 2015). En esta última, intervienen todos los actores de la gestión integral del riesgo. También, la efectividad del SAT está sujeta a factores implícitos, por ejemplo, el diseño del SAT (proceso de validación del diseño) o la integridad y el buen funcionamiento de los equipos de monitoreo y alerta que lo componen. Pese a los avances que se han tenido en el diseño de SAT para avenidas torrenciales, la disponibilidad de información en la región para su validación es muy limitada. En consecuencia, en el diseño de los SAT suele omitirse el proceso de validación (Figura 2), lo que resulta en mayor incertidumbre sobre su funcionamiento. Pocos SAT han sido validados en la región suramericana y los que existen no están orientados a la prevención de catástrofes por avenidas torrenciales (Aristizábal, Gamboa, & Leoz, 2010; Silveira, Chreties, Crisci, Usera, & Alonso, 2015; Correa, García, Bernal, Cardona, & Rodríguez, 2020).

Este artículo presenta la evaluación y los resultados del desempeño técnico del SAT para avenidas torrenciales instalado en Mococa (Colombia) propuesto por Ramos-Cañón et al. (2003). Los umbrales definidos para este SAT fueron puestos a prueba el 12 de agosto de 2018, cuando el sistema oportunamente produjo una alerta que permitió la evacuación de la totalidad de la población asentada en las áreas expuestas (más de 20000 habitantes), antes de que el flujo de lodos impactara la ciudad (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo y Desastres, s.f.; Mi Putumayo, 2018). La efectividad del SAT de Mococa se evaluó mediante la comparación de los datos registrados en los equipos de monitoreo y los umbrales definidos.

### SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA MOCOCA

El casco urbano de Mococa (Putumayo, Colombia) está localizado en la margen derecha del río Mococa, en la parte baja de las microcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco. Estas microcuencas delimitan un área de 18 km<sup>2</sup> y 12.7 km<sup>2</sup>, respectivamente, donde predominan altas pendientes y bajos tiempos de concentración. Estas características son comunes en cuencas con alta susceptibilidad a la ocurrencia de avenidas torrenciales (Figura 3). En la cuenca del río Mococa se han registrado eventos de avenidas torrenciales desde el año 1947 con una periodicidad aproximada de 5 años (Servicio Geológico Colombiano, 2018). Las consecuencias de estos eventos han variado, siendo el evento del 31 de marzo de 2017 el de mayor afectación reportada a la fecha. La avenida torrencial del 2017 inició con fuertes lluvias ocurridas durante la noche y con la contribución de la precipitación acumulada de 4 días previos. Estos dos factores movilizaron sedimentos y material sólido de las laderas en la parte alta de las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco. Los movimientos en masa de las partes altas de las cuencas aportaron material sólido al caudal base de dichos drenajes y provocaron un aumento de caudal significativo, dando lugar a procesos de socavación del lecho de los ríos que resultaron en la avenida torrencial (García-Delgado et al., 2019; Prada-Sarmiento et al., 2019).

El depósito de la avenida torrencial de 2017 se localizó en el casco urbano del municipio y causó la muerte de 332 personas, heridas a 398 más y la desaparición de 77 personas (UNGRD, s.f.). Estos trágicos resultados evidenciaron la necesidad de diseñar e implementar un SAT para flujos de detritos en la cuenca de Mocoa, por lo que, el gobierno nacional a través de la Unidad para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) contrató a la Pontificia Universidad Javeriana para el diseño del SAT y a la empresa FEDERMAN para su instalación y puesta en operación. El SAT que fue diseñado para Mocoa, consideró la combinación de las variables que intervienen en el proceso de las avenidas torrenciales: umbrales de lluvia, umbrales caudal-nivel del río, umbrales intensidad-duración y umbral de lluvia antecedente por una ventana de tiempo de 4 días. Los umbrales fueron obtenidos a partir de la modelación basada en la física de eventos de avenida torrencial y su impacto en las edificaciones e infraestructura ubicada en la zona de inundación del río. También se consideró la información registrada para dos eventos en Mocoa posteriores a la tragedia de marzo de 2017, la revisión bibliográfica de umbrales de precipitación para ocurrencia de movimientos en masa y la información secundaria disponible para la zona de estudio.

Para cada una de las variables se definieron umbrales de alerta (verde, amarilla, naranja y roja, siendo esta última la de mayor amenaza). El detalle de la metodología para el diseño de la instrumentación implementada y de la articulación con los tomadores de decisiones se presenta en Ramos-Cañón et al. (2023). El SAT de Mocoa entró en operación en marzo de 2018 y actualmente es administrado por la UNGRD en trabajo conjunto con el gobierno local del municipio, quienes han desarrollado planes comunitarios de gestión del riesgo de desastres (PCGRD). Los PCGRD se construyen para diferentes barrios dentro del municipio, los cuales se activan una vez que el SAT realiza el llamado a la evacuación. El desarrollo y actualización de los PCGRD en Mocoa ha sido la metodología adoptada por el gobierno nacional para la apropiación social del conocimiento (2021a y 2021b).



Figura 3. Localización de los drenajes de las quebradas Taruquita, Taruca, y los ríos Sangoyaco, Mulato y Mocoa  
Fuente: Autores, 2026.

Nota: Los puntos indicados con letras indican las secciones críticas seleccionadas para la instalación de los equipos de monitoreo del SAT.

### DESEMPEÑO TÉCNICO DEL SAT

Diecisiete meses después del evento catastrófico, ocurrió otra avenida torrencial en el municipio de Mocoa. En esa ocasión, la ciudad ya contaba con el SAT en funcionamiento. Lluvias intensas y prolongadas durante el 12 de agosto de 2018 produjeron la activación del plan de evacuación para los habitantes de Mocoa. Pese a que la precipitación registrada ese día fue de 120 mm–9 mm menos que la registrada el 31 de marzo de 2017–no se registraron pérdidas de vidas humanas ni heridos luego de la ocurrencia del evento.

Los sensores de medición de nivel automático que se instalaron en las secciones críticas transmiten la información al centro de control localizado en las instalaciones del comando de la

Policía Nacional en el casco urbano de Mocoa. La ubicación de las secciones críticas de monitoreo se presenta en la Figura 3 (listadas alfabéticamente). Estas secciones fueron seleccionadas a partir de los resultados de la simulación geotécnica y fluido-dinámica de flujos de detritos, donde se identificaron los puntos en los cuales se presenta inundación incluso con los caudales más bajos para los escenarios considerados (Ramos-Cañón, et al., 2023).

A partir de la información registrada por el evento del 12 de agosto de 2017 se puede evaluar el desempeño de cada uno de los umbrales definidos para el SAT. En esta sección se presentan los datos recopilados por los sensores, comparados con los umbrales definidos por el SAT y con la información de estaciones hidrometeorológicas de la zona.

### Precipitación

Los umbrales pluviométricos se definieron con base en la variable precipitación acumulada que genera el caudal con el que se desborda determinada sección hidráulica. Los umbrales se determinaron a partir de un modelo lluvia-escurrentía que considera la variación de la humedad del suelo previa a un evento de precipitación y la duración de las lluvias en la cuenca (Ramos-Cañón, et al., 2023). La Figura 4 presenta los umbrales para las precipitaciones de la cuenca junto con las precipitaciones registradas la noche del evento del 12 de agosto de 2018 en las estaciones San Antonio, Campucana, Cristalina y Palmeras. Nótese que solo la estación San Antonio alcanza un nivel alerta roja a las 04:08:42 am (GMT-5); 24 minutos después de que la avenida torrencial llegara al casco urbano de Mocoa.

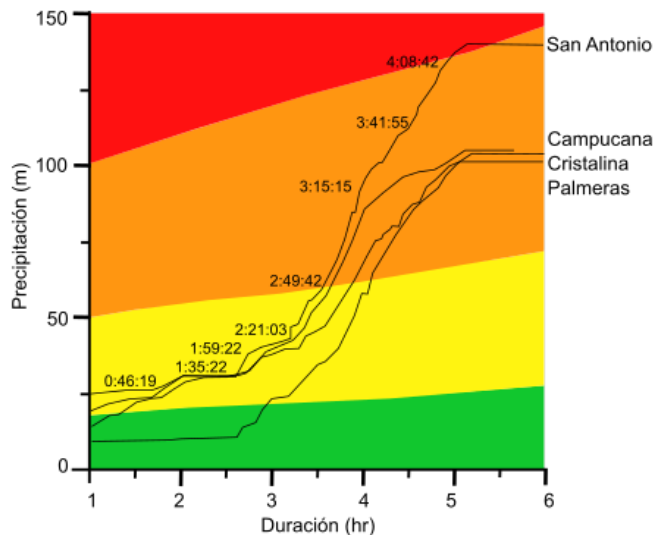


Figura 4. Precipitaciones registradas en el evento del 12 de agosto vs umbrales del SAT  
Fuente: Autores, 2026.

### Caudal - nivel

Teniendo en cuenta los resultados de las modelaciones fluidodinámicas de diferentes escenarios de precipitación y las secciones críticas determinadas, se calcularon las series de caudales con las que se inundan cada una de estas secciones. Para cada caudal de inundación se estimaron los niveles de agua correspondientes en la sección y se establecieron umbrales 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% (Ramos-Cañón, et al., 2023).

La Figura 5 muestra los niveles de agua registrados por los sensores en las secciones transversales Taruca alto (J), Taruquita (C), Confluencia Taruca – Taruquita (B), respectivamente, junto con los umbrales definidos por el SAT. Los sensores se ubicaron en las secciones críticas J, C y B, respectivamente, indicadas en la Figura 3. El sensor de la quebrada Taruca (J) registró un nivel máximo de 2.2 m cerca de las 03:55:00 am (GMT-5), valor que está por debajo del umbral naranja (nivel > 2.3 m) en esa sección. El sensor de la Taruquita (C) dejó de registrar datos a las 03:26:16 am (GMT-5) con un valor cercano a 2.0 m de lámina de agua, correspondiente al umbral de alerta naranja (nivel > 1.7 m). Este sensor dejó de transmitir información dado que la avenida torrencial lo destruyó. Mientras que el sensor de la confluencia alcanzó el umbral de alerta roja (nivel > 2.8 m) alrededor de las 3:29:00 am (GMT-5). Este dejó de funcionar a las 3:35:00 am (GMT-5) registrando un valor máximo de 4.0 m de lámina de agua.

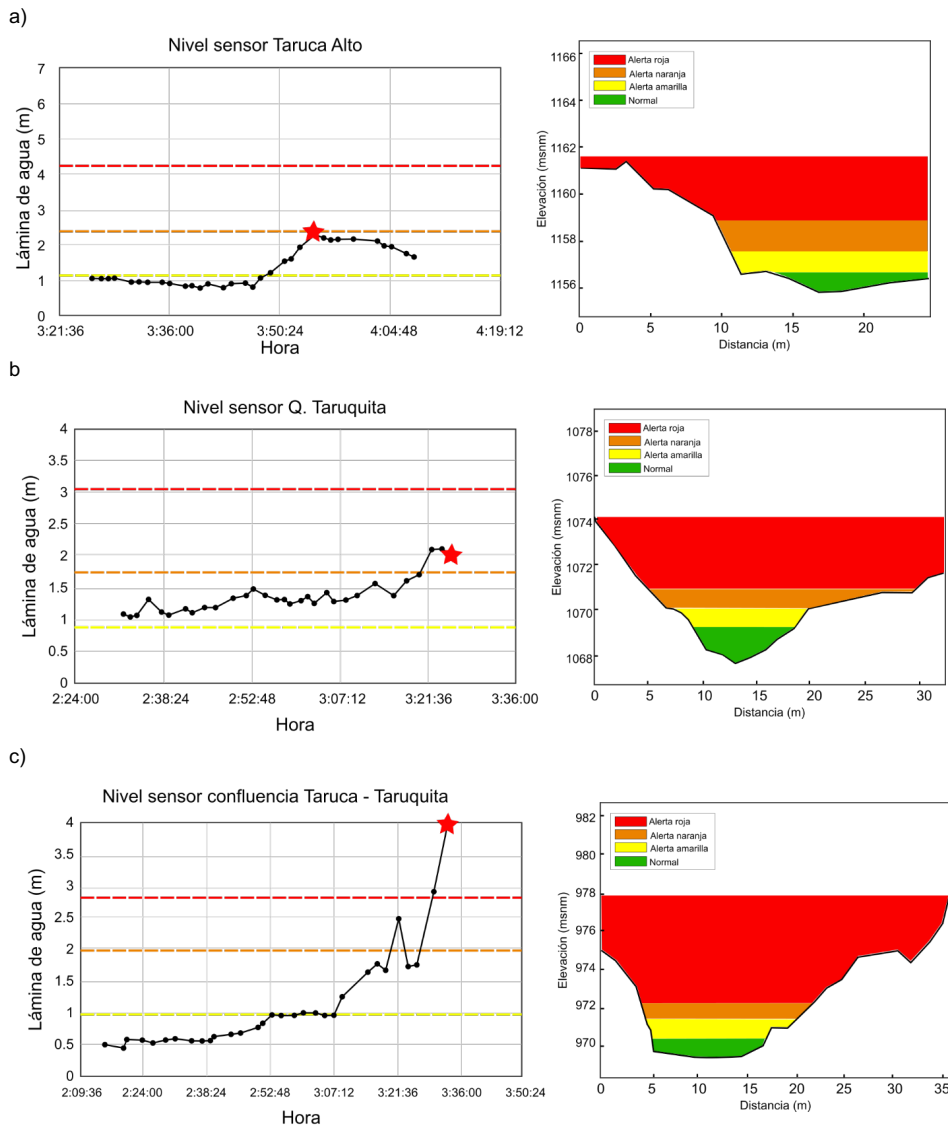


Figura 5. Nivel registrado

Fuente: Autores, 2026.

Nota: Izquierda: Secciones transversales. Derecha: tres puntos críticos analizados (a) J, b) C y c) B) junto con los umbrales definidos para la variable Caudal-Nivel.

A las 03:20:00 am (GMT-5), instante en el que el sensor de la confluencia pasa de alerta amarilla a naranja, los niveles de alerta en la parte alta de la cuenca eran verde (nivel < 1.0 m) para la sección de monitoreo Taruca y alerta naranja (nivel 1.7 m) para la sección de control Taruquita. La cronología de los eventos registrada por los sensores indica que la Quebrada Taruquita tuvo mayor impacto en el aumento del caudal y consecuentemente en la evolución de la avenida torrencial.

#### Precipitación (intensidad - duración) asociada a la falla de taludes

Para la determinación de umbrales de lluvia que generan movimientos en masa, se utilizaron las relaciones intensidad-duración reportadas en la base de datos consolidada por Ramos et al. (2014) y las curvas características para intensidad – duración de las avenidas torrenciales ocurridas en marzo y agosto de 2017. En la Figura 6 se presentan los niveles de alerta para la intensidad dada una duración que generan movimientos en masa en las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita y ríos Mulato y Sangoyaco. Cada nivel de alerta representa una probabilidad de ocurrencia de deslizamiento así: alerta roja con una probabilidad mayor al 70%, alerta naranja entre 50% y 70%, alerta amarilla entre 40% y 50%, y alerta verde con probabilidades menores al 40% (Ramos-Cañón, et al., 2023).

Para la evaluación de desempeño del SAT se compararon los umbrales del SAT para las lluvias que generan movimientos en masa con los datos de las estaciones meteorológicas de la

zona: estación San Antonio, estación Cristalina, estación Campucana y estación Palmeras (Figura 6). La estación Cristalina está ubicada aguas abajo de la zona urbana de Mocoa (zona de depósito de previas avenidas torrenciales), mientras que las demás estaciones de análisis se ubican en la parte alta de la cuenca (zona de alta pendiente). En cuanto a la magnitud intensidad – duración, las precipitaciones registradas, en las cuatro estaciones alcanzaron la alerta roja. Sin embargo, dada la distribución espacial de las cuatro estaciones, el instante de tiempo en que se alcanza cada nivel de alerta es diferente en cada estación.

La Tabla 1 presenta el momento en el que se alcanzó cada nivel de alerta para las cuatro estaciones de análisis. Tanto la estación Palmeras como Campucana alcanzan los niveles de alerta naranja antes de las 00:00 am (GMT-5). Este nivel de alerta se mantiene por dos horas hasta que a las 02:36 am (GMT-5) se alcanza la alerta roja. Pese a que la estación San Antonio está ubicada cerca de las estaciones Campucana y Palmeras (también en zona de alta-media pendiente), los tiempos en los que alcanza los niveles de alerta amarillo y naranja distan en dos horas. El nivel de alerta roja para la estación San Antonio se alcanzó 22 minutos después de la alerta roja en las estaciones cercanas. Nótese que la estación Cristalina alcanza los tres niveles de alerta en tiempos similares a las estaciones Campucana y Palmeras.

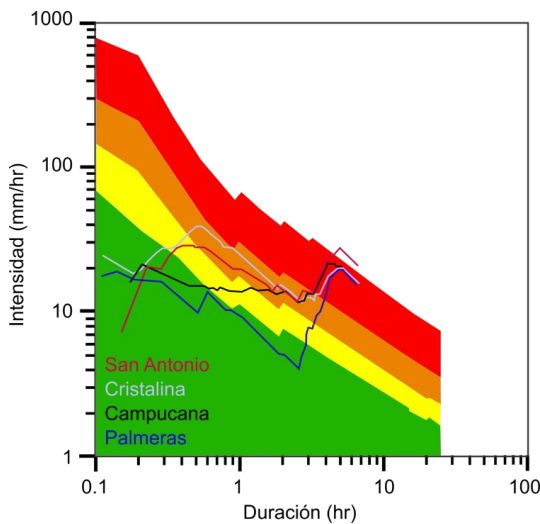


Figura 6. Variable intensidad - duración de precipitación registrada en el evento del 12 de agosto de 2018 vs umbrales del SAT  
Fuente: Autores, 2026.

	San Antonio	Cristalina	Campucana	Palmeras
Amarillo	02:09 12/08/2018	23:57	23:39	23:38
Naranja	02:28	00:35	23:52	23:50
Roja	03:07	02:45	02:45	02:36

Tabla 1. Cronología en función de los umbrales de la variable Intensidad – duración de precipitaciones que pueden detonar deslizamientos  
Fuente: Autores, 2026.

### 3.4 Precipitación acumulada de 4 días que genera deslizamientos

Un análisis de la precipitación previa y posterior al evento de 2017 en Mocoa demostró que, la probabilidad de no exceder la precipitación acumulada en 4 días correspondiente a dicho evento fue significativamente cercana a 1. Lo anterior sugiere que, la lluvia acumulada de 4 días antecedentes al evento del 2017 corresponde a una de las precipitaciones acumuladas más altas que se haya presentado en la zona. También sugiere que es uno de los factores extrínsecos que generan procesos de remoción en masa en la parte alta de las quebradas Taruca y Taruquita (Ramos-Cañón, et al., 2023).

Los niveles de alerta para esta variable fueron determinados en función de las probabilidades de ocurrencia de movimientos en masa. La evaluación del desempeño para esta variable se realizó a partir de la comparación de los umbrales con las precipitaciones registradas la noche del evento

del 12 de agosto de 2018. En la Figura 7 se presentan los niveles de alerta y la evolución de la precipitación acumulada hasta cuatro días antecedentes. Se observa en el detalle mostrado en la Figura 10 que las curvas de precipitación acumulada pasaban los niveles de alerta de naranja a rojo a las 02:30 a.m. (estrella roja en la figura).

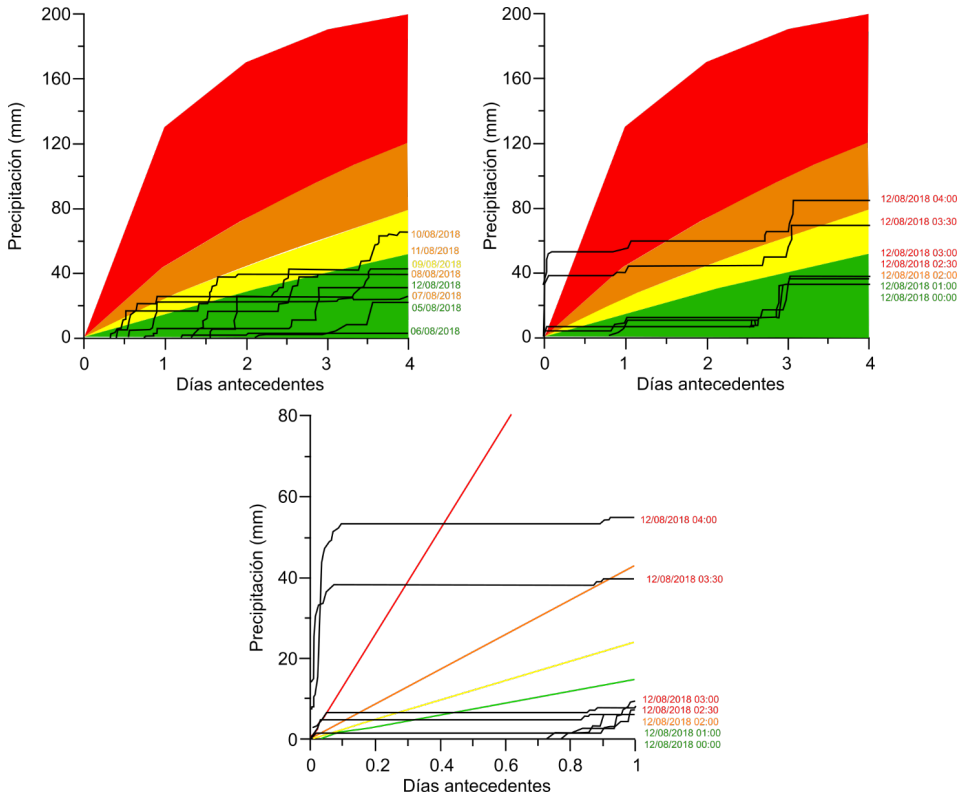


Figura 7. Evolución de la precipitación acumulada de 4 días que genera deslizamientos vs umbrales del SAT  
Fuente: Autores, 2026.

## DISCUSIÓN

La cronología del evento del 12 de agosto de 2018 se pudo reconstruir con la información recopilada de los sensores de nivel instalados en las secciones críticas de monitoreo para el SAT. La Figura 8 compara esta cronología con los umbrales de cada variable definidos en el SAT. Considerando el arribo de la avenida torrencial al casco urbano de Mocoa, que se dio a las 03:44:00 am, se encontró que para la variable precipitación acumulada durante 4 días antecedentes, la alerta roja se alcanzó 74 minutos antes. De otro lado, para la variable intensidad–duración de precipitaciones que detonan movimientos en masa, el nivel de alerta roja se alcanzó 37 minutos antes para la estación San Antonio y 68 minutos antes para las demás estaciones. En cuanto a la variable caudal–nivel, el umbral de alerta roja en la confluencia de las quebradas Taruca y Taruquita se alcanzó 9 minutos antes; y finalmente, para la variable precipitación (lluvia - escorrentía), la alerta roja se alcanzó 24 minutos después.

La variable precipitación (lluvia - escorrentía) fue la única que no alcanzó el umbral de alerta roja. Los modelos de lluvia–escorrentía que suelen ser implementados en un SAT, suponen agua libre de sólidos, característica que no es propia de los flujos de detritos, de lodos o hiperconcentrados. La carga de material sólido suele representar el mayor potencial de peligro para la vida humana en este tipo de eventos. Debido a que los modelos hidrológicos lluvia–escorrentía no reflejan los procesos físicos que se presentan en una avenida torrencial, no deben ser considerados como única variable en el diseño de un SAT.

Los diferentes tiempos de antelación con los que se alcanzaron los umbrales para la alerta roja en las variables del SAT reflejan la importancia de considerar la incertidumbre en el proceso de diseño. Por un lado, la disponibilidad de la información asociada a los detonantes (precipitaciones o eventos sísmicos) y a los procesos físicos subsiguientes (movimientos en masa) es limitada espacial y temporalmente. Por otro lado, los modelos numéricos capaces de simular avenidas

torrenciales no se han desarrollado en su totalidad y requieren simplificaciones que resultan en aproximaciones de la realidad, desconociéndose con certeza la evolución espacial y temporal de las avenidas torrenciales.

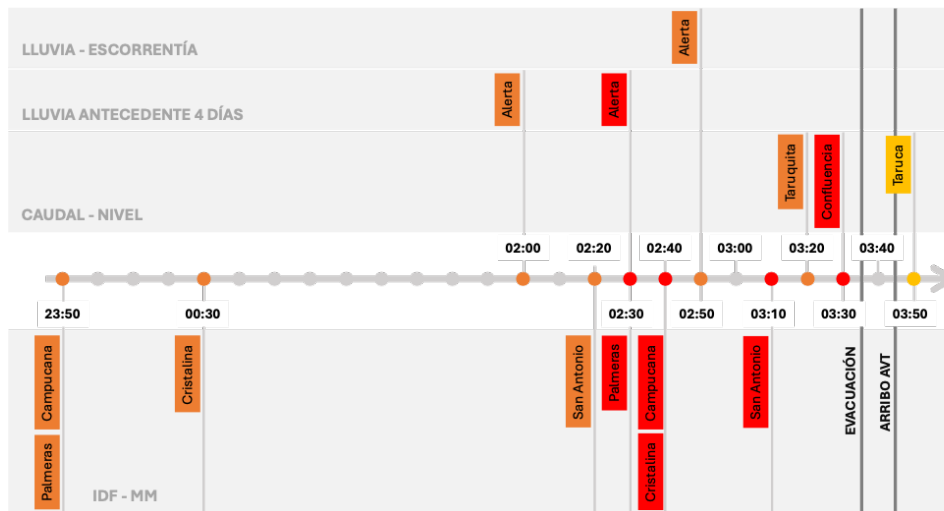


Figura 8. Cronología de los eventos de la avenida torrencial del 12 de agosto de 2018

Fuente: Autores, 2026.

Nota: IDF - MM hace referencia a la variable precipitación que detona movimientos en masa.

En la literatura se acepta que la efectividad de un SAT sea calculada como la relación entre el riesgo ante un evento peligroso, con y sin un SAT. En el caso de Mocoa, los autores proponen una medición de la efectividad del SAT simplificada, dada la complejidad de la cuantificación de la amenaza por AVT y el contexto social del momento en Mocoa. Por tanto, la comparación de los datos de las víctimas ocasionadas por la AVT del 2017 (más de 332 fallecidos) y la del 2018 (0 fallecidos) supone una efectividad del 100% del SAT. Pese al éxito del SAT en la reducción del riesgo, no se desconocen las limitaciones que puede tener el sistema ante cambios de las condiciones iniciales de diseño. Por lo tanto, se requiere la actualización continua de los umbrales y recalibración de los modelos numéricos que permitan la vigencia del sistema con una efectividad del 100%.

Aunque el objetivo de este documento no es profundizar en la efectividad del SAT desde una perspectiva social, es importante recalcar que la apropiación social del conocimiento es clave para una efectiva respuesta de la comunidad. Esta dimensión ha sido abordada por el gobierno nacional a través de PCGRD articulados con el SAT (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2021a; Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2021b). Los PCGRD han permitido que la comunidad reconozca los riesgos a los que se encuentra expuesta y conozca su rol dentro de la gestión del riesgo de desastres; de esta forma se articula el conocimiento científico con la dimensión social y se produce una efectiva respuesta ante la emergencia que conlleva a la reducción de pérdidas de vidas y heridos.

## 5 Conclusiones

Se recopiló la información de la avenida torrencial que ocurrió el 12 de agosto de 2018 en Mocoa posterior a la implementación del SAT. La cronología de los eventos de esa noche indica que el SAT brindó la información necesaria para emitir la orden de evacuación de la población expuesta en ese momento (más de 20000 habitantes), nueve minutos antes de que la avenida torrencial impactara el casco urbano del municipio. Como resultado de una oportuna orden de evacuación, no se registró ninguna fatalidad a causa de ese evento, reduciendo el riesgo por avenidas torrenciales.

El SAT para Mocoa funciona a través de la combinación de umbrales para diferentes variables que intervienen en el proceso de las avenidas torrenciales. Los resultados de la evaluación de su desempeño técnico mostraron que las variables que relacionan la probabilidad de falla de taludes con la precipitación alcanzaron el nivel de alerta rojo una hora antes de que el evento impactara

el casco urbano de Mocoa. La antelación con la que se alcanzó el umbral de alerta roja en estas variables da un indicio de su conveniencia dentro del SAT. Por otro lado, las variables relacionadas con precipitación-caudal alcanzaron umbrales menores a los necesarios para la activación del plan de evacuación o alcanzaron el nivel necesario tiempo después del impacto del evento en la zona poblada.

Los modelos de lluvia–escorrentía que suelen ser implementados en un SAT suponen agua libre de sólidos, característica que no es propia de los flujos de detritos, de lodos o hiperconcentrados. Debido a que los modelos hidrológicos lluvia–escorrentía no reflejan los procesos físicos que se presentan en una avenida torrencial, no deben ser considerados como única variable en el diseño de un SAT. Pese a los avances técnicos que se han tenido en el diseño de SAT de AVTs, la disponibilidad de información para su validación en la región es muy limitada. Los modelos numéricos capaces de simular avenidas torrenciales no se han desarrollado en su totalidad y requieren simplificaciones que resultan en aproximaciones de la realidad, desconociéndose con certeza la evolución espacial y temporal de las avenidas torrenciales. Además, como consecuencia de la ocurrencia de eventos de gran magnitud que puedan generar cambios importantes en la morfología de las secciones de monitoreo, se requiere que los niveles-umbrales que activan el SAT y los modelos numéricos que simulan las AVTs se mantengan actualizados posterior a dichos eventos para evitar la obsolescencia del SAT. También es importante considerar la incertidumbre de los datos iniciales y su propagación en el proceso de diseño e implementación, que, aunado con la complejidad de los procesos físicos de una avenida torrencial, demandan un SAT redundante.

Si bien esta evaluación del desempeño técnico del SAT de Mocoa demostró la necesidad de definir umbrales de alerta para diferentes variables, el éxito de su implementación radica en la apropiación social del conocimiento, un factor crucial dentro del marco de la gestión integral de riesgo de desastres en donde se consideran aspectos como la gobernanza y el desarrollo sostenible en la reducción del riesgo de desastres (Sandoval et al, 2023). Previa ocurrencia del evento del 12 de agosto de 2018, se realizó la socialización y apropiación del conocimiento del SAT de Mocoa con la comunidad. Estas jornadas incluyeron varios ejercicios de evacuación enmarcados en la preparación para la respuesta ante el desastre, con el fin de que la población tuviera el conocimiento geográfico de los sitios seguros en el momento en que se generó la alerta. Es posible que el desempeño técnico del SAT hubiese sido positivo; sin embargo, el resultado final depende de la respuesta de la comunidad, donde la apropiación del conocimiento es crucial. Las evaluaciones de desempeño no deben ser exclusivamente técnicas, sino que también se deben considerar las dinámicas sociales que responden a la emergencia. Se identifica como trabajo futuro, la evaluación del desempeño social de los planes comunitarios de gestión del riesgo de desastres PCGRD articulados con el SAT que ha adelantado el gobierno nacional.

La evaluación del riesgo por AVT y los umbrales del SAT deben ser actualizados constantemente, dada la dinámica natural de los cauces, la ocurrencia de eventos que alteran la cantidad de material sólido susceptible de incorporarse a un proceso de avenida torrencial, la variabilidad y cambio climático, entre otros factores. Como parte del establecimiento de estrategias de gobernanza en la gestión del riesgo de desastres, el gobierno nacional debe garantizar los recursos necesarios para la elaboración y actualización de evaluaciones de riesgo y diseño de SATs, y a su vez los actores privados y comunitarios deben reconocer los resultados y apropiarse de su rol en la reducción del riesgo y el manejo del desastre. Lo anterior, en cumplimiento de la responsabilidad de la gestión del riesgo de desastres y con miras a garantizar la efectividad y sostenibilidad del SAT.

## REFERENCIAS

- Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., & Thielen, J. (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environmental science and policy*, 21, 35-49.
- Arattano, M., & Marchi, L. (2008). Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning. *Sensors*, (8), 2436-2452.
- Aristizábal, E., Gamboa, M., & Leoz, F. (2010). Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 155-169.

- Bacchini, M., & Zannoni, A. (2003). Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of cancia (dolomites, northeastern Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(1/2), 71–79.
- Calvello, M., d’Orsi, R., Piciullo, L., Paes, N., Magalhaes, M., & Lacerda, W. (2014). The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010–2013. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 3–15.
- Correa, C., García, F., Bernal, G., Cardona, O., & Rodriguez, C. (2020). Early warning system for rainfall-triggered landslides based on real-time probabilistic hazard assessment. *Natural hazards*, 100, 354–361.
- García-Delgado, H., Machuca, S., & Medina, E. (2019). Dynamic and geomorphic characterizations of the Mocoa debris-flow (march 31, 2017, Putumayo department, southern Colombia). *Landslides*, 597–609. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-01121-3>
- Hernández, C. (2018, 12 de agosto). Alerta temprana permitió que 20000 personas fueran evacuadas en Mocoa. *El tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/emergencia-en-mocoa-no-deja-muertos-ni-heridos-254860>
- Jakob, M., Owen, T., & Simpson, T. (2012). A regional real-time debris-flow warning system for the district of north Vancouver, Canada. *Landslides*, 9, 165–178. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0282-8>
- Mi Putumayo. (2018, 12 de agosto). Conclusiones puesto de mando unificado por emergencia en Mocoa. *Mi Putumayo*. <https://miputumayo.com.co/2018/08/12/conclusiones-puesto-de-mando-unificado-por-emergencia-en-mocoa/>
- Pontificia Universidad Javeriana. (2018). *Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de las microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa*. Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Prada-Sarmiento, L., Cabrera, M., Camacho, R., Estrada, N., & Ramos-Cañón, A. (2019). The Mocoa event on march 31 (2017): analysis of a series of mass movements in a tropical environment of the andean-amazonian piedmont. *Landslides*, 16, 2459–2468. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01263-y>
- Ramos-Cañón, A. M., Reyes, A., Munévar, M., Ruiz, G., Machuca, S., Rangel, M., [...] Pérez, M. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>
- Ramos-Cañón, A., Munévar-Peña, M., Prada-Sarmiento, L., Escobar-Vargas, J., Vargas-Luna, A., Prieto, A., [...] 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 de riesgos de desastres REDER*, 7(2), 142–155. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.129>
- Ramos-Cañón, A., Trujillo-Vela, M., & Prada-Sarmiento, L. (2014). Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras y proyectos*, 63–75.
- Sandoval, V., Voss, M., Flörchinger, V., Lorenz, S. & Jafari, P. (2023). Integrated Disaster Risk Management (IDRM): Elements to Advance its Study and Assessment. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(3), 343–356. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00490-1>
- Sattelle, M., Brundl, M., & Straub, D. (2015). Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning. *Reliability Engineering and System Safety*, 142, 192–202.
- Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Amenaza por movimientos en masa tipo flujo de las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio y El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco, Municipio de Mocoa, Escala 1:5000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Silveira, L., Chreties, C., Crisci, M., Usera, G., & Alonso, J. (2015). Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno. *Revista del laboratorios tecnológico del Uruguay*, 56–63.
- Tiranti, D., & Rabuffeti, D. (2010). Estimation of rainfall thresholds triggering shallow landslides for an operational warning system implementation. *Landslides*, 7, 471–481. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0198-8>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2021a). *Plan Comunitario de Gestión del Riesgo de Desastres barrio La Independencia*. Mocoa: Alcaldía de Mocoa.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2021b). *Ian Comunitario de Gestión del Riesgo de Desastres barrio San Agustín*. Mocoa: Alcaldía de Mocoa.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD. (2021). *Guía para el desarrollo de sistemas de alerta temprana (SAT)*. Bogotá: UNGRD.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo y Desastres. (s.f.). *Construyendo Mocoa*. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/mocoa>