



XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018

UMBRALES DE PRECIPITACIÓN PARA EL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR INUNDACIÓN DE LA CIUDAD DE MANIZALES, COLOMBIA.

Antonio CASTILLO RUALES¹, Philippe CHANG², Jorge J. VÉLEZ UPEGUI²

¹Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Estudiante de Maestría – Recursos hidráulicos, Colombia.

²Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Profesor asociado al Departamento de Ingeniería Civil, Colombia.
acastillorua@unal.edu.co, pchang@unal.edu.co, jjvelezu@unal.edu.co

RESUMEN

En los últimos años la ciudad de Manizales se ha visto afectada por eventos extremos de precipitación que derivan en crecidas torrenciales de sus principales quebradas. El objetivo de este trabajo es determinar umbrales de precipitación que permitan la activación de las alarmas en los sistemas de alerta temprana locales. Un modelo hidrológico distribuido (TETIS) fue usado para la simulación de eventos sintéticos de precipitación construidos a partir de patrones de distribución locales, bajo diferentes escenarios de condiciones de humedad antecedente. Las márgenes de inundación, niveles y propiedades hidráulicas del flujo fueron evaluadas con un modelo hidráulico bidimensional (IBER). Los umbrales se determinaron a partir de la correlación entre precipitación y niveles de inundación para las secciones críticas de los canales. Finalmente, los resultados sugieren que las cuencas responden sensiblemente a los cambios de intensidad en la precipitación, y no tanto para la duración y magnitud de la lluvia.

ABSTRACT

Over the last few years, Manizales city has been affected by extreme rainfall events that cause flash floods over the main rivers. The aim of this study is determining rainfall thresholds in order to disseminate warnings provided by a local early warning system. A distributed hydrological model (TETIS) was used to simulate synthetic rainfall events developed from local distribution curves, and under different antecedent moisture conditions (AMC) scenarios. Flood boundaries, river water levels and hydraulics flow properties were evaluated with bidimensional hydraulic model (IBER). A correlation rainfall-flood water levels, over the critical cross sections, was used to determining rainfall thresholds. Finally, results suggest response over the catchment is sensitive to changes in the intensity of precipitation, but not for the duration and magnitude rainfall.

PALABRAS CLAVE: Umbrales de precipitación, Crecidas Repentinas, Riesgo de inundación, Sistema de alerta temprana.

Mayor Información



INTRODUCCIÓN

Las crecidas repentinas son definidas como inundaciones que se caracterizan por su corta duración y un caudal máximo relativamente alto (UNESCO & OMM, 2012), generalmente como resultado de una alta intensidad de precipitación sobre un área relativamente pequeña (NOOA, 2012). En los últimos años, las comunidades asentadas sobre las riberas de las quebradas urbanas de Manizales, Caldas (Colombia) han sido afectadas por estos eventos hidroclimatológicos. En especial, estos eventos han afectado los centros poblados y zonas industriales de la cuenca Quebrada Manizales, causando pérdidas materiales significativas y evidenciando un alto riesgo de inundación (Quintero, 2013; Serna, 2012). En respuesta a estos eventos, las autoridades locales desarrollaron un plan de acción sobre la cuenca que permita la adaptabilidad, reducción y respuesta frente al riesgo de inundación (CORPOCALDAS, 2011).

A partir de convenios interinstitucionales, y con el fin de permitir la evacuación anticipada de las comunidades, un Sistema de Alerta Temprana (SAT) por inundación fue planteado como una medida no estructural para la reducción del riesgo. De acuerdo con (UNISDR, 2006), Los SAT centrados en la población se componen de la interrelación de cuatro elementos: conocimiento de los riesgos, servicio de seguimiento y alerta, difusión y comunicación, y capacidad de respuesta. En este sentido, la implementación del SAT por inundación de Manizales ha considerado diferentes estudios en la evaluación del riesgo (Arturo & Tobón, 2009; Legarda Garzón, 2013), identificando las características de las amenazas naturales, y las zonas geográficas que podrían verse afectadas (mapas de amenazas).

En cuanto al elemento de seguimiento y alerta, en el año 2014, se instalaron estaciones hidrometeorológicas y de alarma sonora, ubicadas en puntos estratégicos sobre tres cuencas urbanas: Quebrada Manizales, Olivares y El Guamo. El almacenamiento, procesamiento y disponibilidad de la información generada por estas redes de monitoreo está a cargo del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC). Y el análisis de la información recolectada anteriormente constituye la base en la predicción y generación de alertas (UNISDR, 2006). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar las condiciones de precipitación (umbrales) que ocasionan las crecidas repentinas para el adecuado funcionamiento del SAT.

Los umbrales de alerta se definen como las condiciones hidroclimatológicas bajo las cuales se toma la decisión de emitir las alertas a las comunidades (Sene, 2008). Debido a que las lluvias intensas son la causa más común de las crecidas repentinas (National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, 2012), los umbrales están relacionados directamente con la precipitación y existen numerosas metodologías que permiten determinarlos en función de la información disponible, grado de tecnología y complejidad del sistema (Montesarchio et al., 2015). Dentro de las familias metodologías se encuentran los métodos empíricos, métodos basados en modelos hidrológicos y métodos probabilísticos (Martina, et al., 2006). En este sentido, este artículo propone umbrales de precipitación calculados en base a un modelo hidrológico distribuido y un modelo hidráulico bidimensional, con el propósito de incorporarlos en el SAT de la ciudad de Manizales.

ANTECEDENTES DE LOS UMBRALES DE PRECIPITACIÓN

El concepto de umbral de precipitación fue inicialmente adoptado por Caine (1980) para determinar la lluvia que desencadena los movimientos en masa sobre las laderas (Montesarchio et al., 2015). Posteriormente, este concepto se adaptó en los SAT por inundación, con el propósito de establecer un criterio para la emisión de alarmas; definiéndose como: la cantidad de lluvia acumulada para una

Mayor Información



duración dada, que genera un caudal crítico sobre una determinada sección transversal del río (Georgakakos, 1995). Actualmente, los umbrales de precipitación para inundaciones pueden determinarse a partir de las siguientes metodologías; (a) métodos empíricos, (b) a partir de modelación hidrológica y (c) por métodos probabilísticos (Montesarchio et al., 2015).

Los métodos empíricos se basan en datos históricos de inundaciones y lluvia; que relacionan la ocurrencia del evento con la profundidad y duración de la precipitación crítica por medio de una ecuación potencial (Cannon et al., 2008; Diakakis, 2012; Montesarchio et al., 2015). Esta metodología fue usada por (Ávila, Carvajal, & Justino, 2015) para la cuenca del Río Cali (Valle del Cauca); en donde a partir de 27 datos históricos de inundaciones y de precipitación diaria, se establecieron umbrales de lluvia acumulada antecedente a largo plazo (5 a 25 días) entre los 73-273 mm. Sin embargo, los umbrales fueron calculados en base a la información disponible de precipitación (diaria y no horaria), por lo tanto, este enfoque se ajusta mejor para ríos con procesos de inundaciones fluviales y no para crecidas repentinas (Santos & Fragoso, 2016).

La segunda metodología de umbrales parte de la Guía de Crecidas Repentinias (FFG por sus siglas en inglés) propuesta por (Mogil, Monro, & Groper, 1978). El método FFG consiste en una modelación hidrológica inversa para determinar la cantidad de lluvia que genere el menor caudal de inundación en la salida de la cuenca. Las alertas se emiten si el umbral FFG es superado por los datos observados en tiempo real o lluvia pronosticada para una duración determinada, siendo necesaria la instrumentación de la cuenca por medio de estaciones meteorológicas o radar (Norbiato, Borga, & Dinale, 2009). FFG es ampliamente utilizado y en su evolución ha incorporado la modelación de diferentes formas de hietogramas sintéticos, el uso de modelos espacialmente distribuidos y la condición de humedad antecedente del suelo (Moore, 2002). En los últimos años, los modelos hidráulicos han sido introducidos para que los umbrales sean calculados en función de la geometría del canal, y la relación entre el nivel del agua alcanzado y el área de inundación (Candela & Aronica, 2016; Wu, Hsu, Lien, & Chang, 2015).

La última familia metodológica se basa en métodos probabilísticos que buscan establecer la dependencia entre la lluvia y las posibles consecuencias (en términos económicos) sobre una sección del río (Golian, Saghafian, & Maknoon, 2010). Por lo anterior, los umbrales de precipitación son obtenidos al minimizar dos funciones diferentes: una función de utilidad asociada a la teoría Bayesiana; que permite establecer una medida en la percepción de daño, y una función de riesgo basado en el concepto de entropía; que brinda una medida de las incertidumbres dentro del sistema (Martina et al., 2006). Por lo tanto, la anterior metodología está diseñada para simplificarle a los tomadores de decisiones el proceso de emisión de alarmas, permitiendo evaluar el costo/beneficio de activar o no los protocolos de respuesta del SAT.

Finalmente, en (Montesarchio et al., 2015) se describen las metodologías para la evaluación de los umbrales, es decir, la confiabilidad y desempeño de estos frente a los eventos de precipitación. La confiabilidad de los umbrales fue definida por Manson (1982), y se obtiene evaluando el desempeño en cuanto a la: la tasa de aciertos (probabilidad de detección), y la tasa de falsas alarmas (probabilidad de error), en una serie de eventos históricos.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la cuenca de la Quebrada Manizales, localizada al oriente de la capital del Departamento de Caldas, entre las coordenadas geográficas $5^{\circ}02'$ – $5^{\circ}04'$ sobre la latitud norte y $75^{\circ}23'$ – $75^{\circ}29'$ longitud oeste. La cuenca presenta una superficie de 32 km^2 ; con una distribución

Mayor Información

aproximada del 56% de área rural sobre la parte alta de cuenca, y un 44% de área urbana en la parte baja. La parte alta de la cuenca se caracteriza por fuertes pendientes, la existencia de zonas de reserva forestal, y el desarrollo de actividades agropecuarias y mineras. Por otra parte, en la zona baja se encuentra la zona industrial de la ciudad (Aristizabal, 2015), y los asentamientos urbanos como: Maltería, Verdum, Bajo Juanchito y San Marcel, que se encuentran en alto riesgo de inundación (Quintero, 2013). La Quebrada Manizales nace sobre los 3.266 m.s.n.m, y recorre 12.8 km a través de la cuenca con una pendiente aproximada del 10 %, para desembocar finalmente sobre el Río Chinchiná a los 1.947 m.s.n.m (CORPOCALDAS, 2011). La cuenca se encuentra instrumentada con estaciones hidrometeorológicas en cada uno de sus principales afluentes: Quebrada Tesorito, Quebrada Cristales y Quebrada Guayabal, además, se tienen dos estaciones meteorológicas sobre la parte alta de la cuenca y dos estaciones de alarma sonora en puntos estratégicos de los centros poblados (Figura 1).

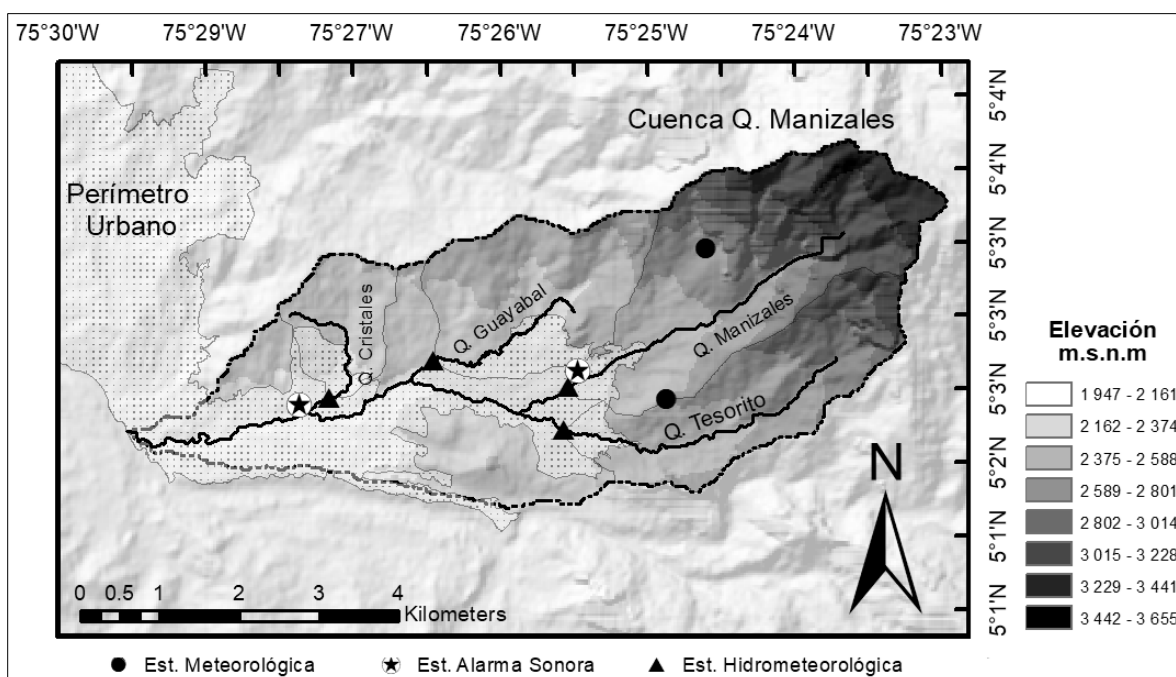


Figura 1.- Localización cuenca Quebrada Manizales y estaciones hidrometeorológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Información hidrometeorológica: Los datos de precipitación y niveles a escala cincominutal fueron obtenidos a través de la bodega de datos del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC) y el Instituto de estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, en la Tabla 1 se muestran los datos de la red de monitoreo sobre la cuenca Q. Manizales analizados. No se realizó el cálculo de umbrales por métodos empíricos debido a que el periodo de registro de datos por parte de las estaciones meteorológicas es corto (aproximadamente 3 años), y no se cuenta con una amplia base de datos de eventos de inundación para la cuenca en específico. Por lo tanto, el análisis de las series de precipitación consistió en seleccionar un evento de lluvia reciente que haya ocasionado un incremento considerable en los niveles de la quebrada, de tal forma que permita la calibración de los modelos y los umbrales.

Mayor Información

Tabla 1.- Listado de estaciones de la Red SAT Quebrada Manizales

Estación	Tipo	Año de instalación	Latitud N	Longitud W	Ubicación
Finca La Paz	M	2014	5°2'3.93"	75°25'9.27"	Km 9 vía al Magdalena
Hacienda Manzanares	M	2014	5° 3' 16.2"	75° 24' 40.68"	Parte Alta de la cuenca Q. Manizales
Q. Manizales-Skinco	H	2014	5°2'19.18"	75° 25' 49.08"	Zona Industrial Juanchito
Q. Tesorito	H	2010	5° 2' 15.9"	75° 26' 3.26"	Puente vía al Magdalena
Q. Guayabal Recinto El Pensamiento	H	2014	5° 2' 29.15"	75° 26' 44.45"	Recinto El Pensamiento - Sector Auditorio
Q. Cristales - Valles del Alhambra	H	2015	5° 2' 16.81"	75° 27' 24.54"	Conjunto Cerrado Valles del Alhambra

Convenciones: M: Meteorológica; H: Hidrometeorológica

Determinación de lluvias de diseño: los hietogramas de diseño fueron establecidos para los periodos de retorno (Tr) de 2.33, 15, 40 y 100 años. La determinación de la lluvia acumulada para cada Tr se basó en la modelación hidrológica sobre la cuenca del río Chinchiná con el modelo TETIS (Ocampo L, 2012), que determinó los mapas de distribución espacial de la precipitación asociado a cada Tr . La duración del evento fue definida igual al tiempo de concentración calculado con fórmulas empíricas (Vélez & Botero, 2011) en el punto de salida de cada subcuenca (localización de cada estación hidrometeorológica). Y finalmente, se seleccionaron 3 patrones de distribución temporal de la precipitación de acuerdo a la duración del evento, que fueron obtenidos para la ciudad de Manizales por (Rincón, Vélez, & Chang, 2015). Los dos primeros patrones de distribución de lluvia corresponden a la media y al percentil del 5% de la estación más cercana a la cuenca, y el tercer patrón corresponde a la media de las estaciones de la ciudad de Manizales. Los patrones de distribución temporal de precipitación se seleccionaron con el fin de representar diferentes formas de hietogramas, es decir que cada distribución refleje el pico de intensidad de la lluvia en diferentes momentos de la duración del evento (Mancini et al., 2002)

Modelación hidrológica: En este trabajo se realizó la actualización de la modelación hidrológica, que se había implementado sobre la cuenca del Río Chinchiná en (Vélez & Ocampo, 2014) mediante el modelo distribuido TETIS. Por lo tanto, se obtuvieron los hidrogramas de salida en cada subcuenca, modelando los diferentes hietogramas bajo 3 escenarios de condición de humedad antecedente (AMC). En la Tabla 2 se muestran la relación entre los diferentes escenarios de AMC, a partir del total de lluvia antecedente en 5 días (Soil Conservation Service, 1986), y los parámetros de estado inicial de TETIS. Finalmente, también se modeló la precipitación registrada en la tarde del 07 de noviembre de 2017 con el fin de obtener el hidrograma que permita la calibración del modelo hidráulico.

Mayor Información

Tabla 2. Parámetros estado inicial TETIS para condición de humedad Antecedente.

Parámetro	AMC I	AMC II	AMC III
H1- Almacenamiento estático	50	80	100
H2- Agua en superficie	0	0	0
H3- Almacenamiento gravitacional	10	10	10
H4- Estado inicial del acuífero	50	50	50
H5- Caudal en el cauce	20	50	100
H6- Intercepción por la vegetación	0	0	0

Modelación hidráulica: El modelo numérico bidimensional de volúmenes finitos IBER fue utilizado para determinar las variables hidráulicas generadas por los anteriores hidrogramas, mediante la simulación de flujo turbulento en régimen variable (Bladé et al., 2014; Cea & Bladé, 2008). Por lo tanto, se realizaron las respectivas actividades de preprocesamiento de la información que requiere el modelo, determinándose así: la digitalización de los mapas de uso del suelo asociado a un coeficiente de rugosidad con valores iniciales sugeridos por (US Army Corps of Engineers, 2010), la determinación de las dimensiones de las obras hidráulicas presentes sobre el canal, y la creación del modelo digital del terreno representado por una malla de elementos triangulares que se obtuvo a partir del Levantamiento LIDAR de la ciudad de Manizales con resolución de 1.00 m (AEROESTUDIOS S.A, 2014).

Calibración: la calibración de los coeficientes de rugosidad en el modelo hidráulico se realizó mediante la selección del evento de precipitación de la tarde del 07 de noviembre de 2017, que generó un incremento considerable en los niveles de la quebrada Manizales (La Patria, 2017). Para lo anterior, el evento fue modelado en TETIS y se obtuvo los hidrogramas de salida en cada subcuenca, posteriormente estos hidrogramas fueron modelados en IBER con el fin de comparar los niveles simulados y niveles observados. Por último, los resultados se evaluaron mediante el criterio de Nash-Sutcliffe.

Determinación de los umbrales: los umbrales fueron determinados a partir de las secciones críticas de la quebrada. Se seleccionó 5 secciones transversales críticas a lo largo del canal, teniendo en cuenta viviendas, infraestructura y vías cercanas al cauce que se encuentren en alto riesgo de inundación (Candela & Aronica, 2016). Para lo anterior se definieron 3 niveles de riesgo sobre la sección transversal crítica del canal, los cuales corresponden: a) 80% del nivel de banca llena, b) nivel de banca llena y c) nivel de afectación a la infraestructura. Finalmente, los umbrales se establecieron mediante una correlación entre la precipitación y los niveles de riesgo mencionados anteriormente.

RESULTADOS

Los umbrales fueron calculados en base a un modelo hidrológico distribuido teniendo en cuenta diferentes patrones de distribución. La Figura 2 muestra los 3 patrones de distribución temporal de la precipitación utilizados; cada patrón de precipitación representa la máxima intensidad de lluvia en diferentes instantes de tiempo con respecto a la duración total del evento, es decir, hietogramas de forma triangular con el pico de intensidad de lluvia al inicio, mitad y final del evento. El patrón de distribución 2 se considera el más crítico debido a que la máxima intensidad de precipitación se presenta al final del evento, esto significa que la capacidad de infiltración del suelo se ha reducido por la lluvia inicial (para la primera mitad del tiempo total del evento, solamente se tiene el 20% del total de lluvia acumulada); y

Mayor Información

por lo tanto se genera mayor escorrentía efectiva en el final del evento (el 80% del total de lluvia acumulada se precipita en la segunda mitad del tiempo total del evento).

Lo anterior se evidencia en los resultados de la modelación hidrológica, en donde se muestran los hidrogramas de salida para los 4 periodos de retorno, con los 3 patrones de distribución y bajo los 3 escenarios de condición de humedad antecedente. Los resultados varían entre los 28.3 m³/s para un Tr=2.33 años, con patrón de distribución 3 y escenario AMCI; y los 160.8 m³/s para el Tr=100 años con un AMCIII y distribución 2. En general, los mayores caudales se obtuvieron bajo condiciones iniciales de suelo saturadas (AMCIII), y con patrón de distribución 2.

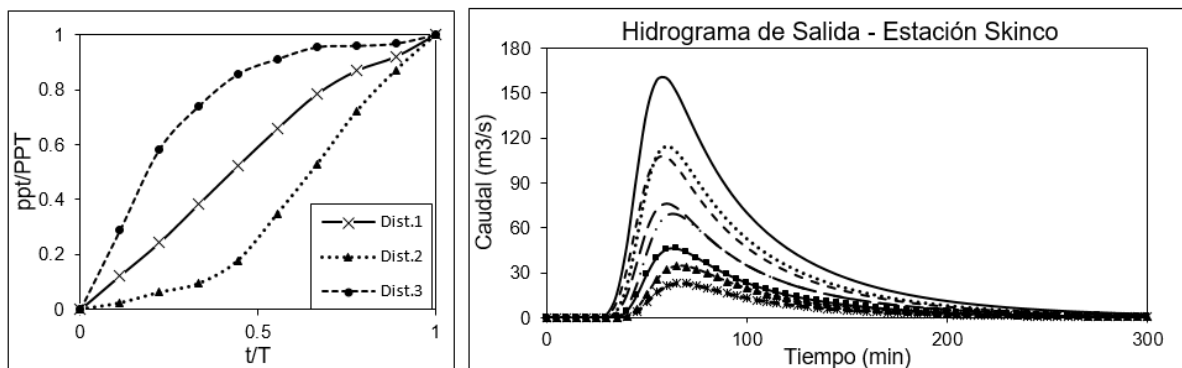


Figura 2. A) Patrones de distribución temporal para la lluvia de diseño. B) Hidrogramas de salida obtenidos en TETIS para la estación Skinco Q. Manizales

La calibración del modelo hidráulico se realizó modificando los parámetros correspondientes a los coeficientes de rugosidad del modelo hidráulico para conseguir un ajuste aceptable para el evento del 07 de noviembre de 2017. Los datos indican que el evento inició aproximadamente a las 14:20 y tuvo una duración de 01:20 minutos con una magnitud entre los 32.8 mm para la estación Q. Tesorito (Figura 3), 30.2 mm para la estación Skinco, 45.8 mm para la estación Finca La Paz, y 1.6 mm para Hacienda Manzanares (que no reportó los datos adecuadamente debido a problemas con el pluviómetro). Además, el pico de la precipitación se produjo en promedio a las 14:41 con una intensidad de 8.2 mm en 5 min. Por otra parte, los datos de niveles muestran que el pico máximo se presentó a las 15:05 para la Q. Tesorito con un valor de 183.17 cm, a las 15:01 para Q. Manizales con un valor de 38.04 cm, a las 15:17 para Q. Cristales con un nivel de 102.08 cm, y a las 15:22 para Q. Guayabal con un nivel de 86.85 cm. Los anteriores resultados muestran que la diferencia entre la máxima precipitación y máximo nivel es de 20 minutos, y que además el máximo nivel se presentó antes de finalizar el evento de precipitación.

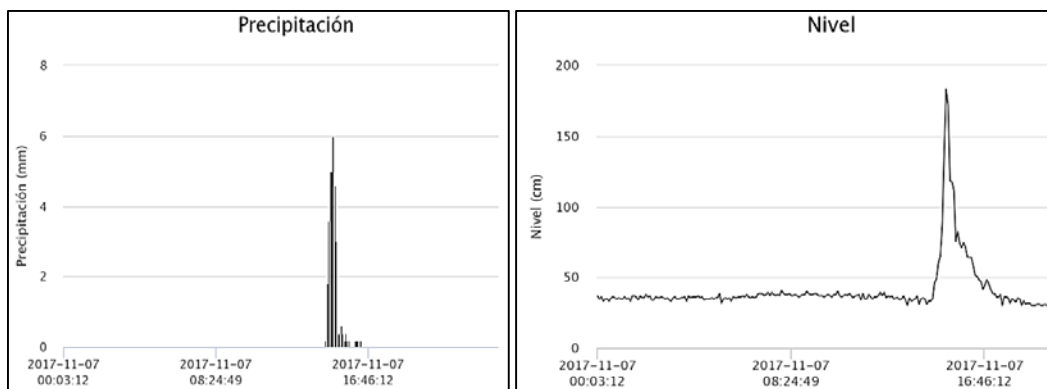


Figura 3. Evento 07-nov-2017, precipitación y niveles estación Q. Tesorito.

Mayor Información

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos en el modelo TETIS bajo el escenario de AMCI. Se observa que la subcuenca Skinco Q. Manizales presenta un mayor caudal pico debido su mayor área aferente, seguido por la subcuenca Q. Tesorito que se caracteriza por presentar un tiempo al pico menor que el resto de estaciones. El nivel máximo simulado de la estación Q. Tesorito subestima a los valores observados; 144 cm de nivel simulado frente a un nivel observado de 183 cm, obteniéndose un error porcentual de 21% y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de $E=0.68$. Adicionalmente, el tiempo al pico se simula correctamente, sin embargo, debido a que el máximo de los niveles observados es más acentuado, la curva de recesión presenta un desajuste al sobrestimar los datos observados.

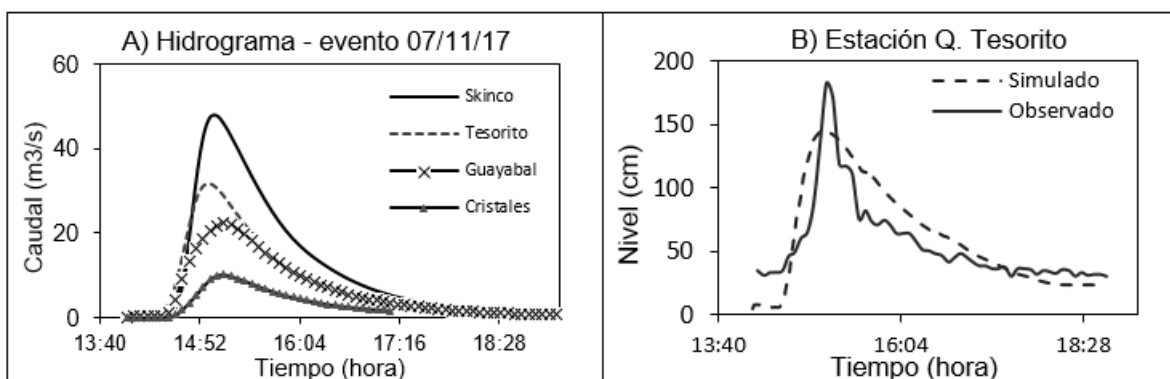


Figura 4. A) Hidrogramas de salida del evento 07/11/17 para las diferentes estaciones AMCI. B) Niveles simulados vs observados para la estación Q. Tesorito evento 07/11/17.

Una vez calibrado el modelo hidráulico se realizó la simulación de los hidrogramas obtenidos, para un escenario AMCI. En general, los resultados muestran márgenes de inundación (Figura 5) que se ajustan a los registros fotográficos de los eventos históricos de crecidas repentinas para esta cuenca. Además, los resultados muestran que tanto en los barrios como en la zona industrial de la parte media-baja de la cuenca aún persiste un riesgo significativo de inundación; a pesar de las obras de control torrencial construidas sobre la parte alta de la Quebrada Manizales.

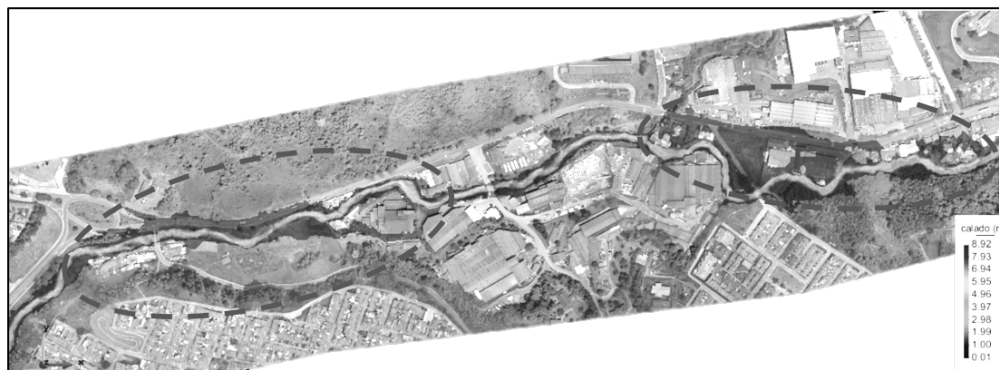


Figura 5. Resultados de modelación hidráulica bidimensional en IBER para el tramo 3 de la quebrada Manizales, $T_r=40$ años.

Tabla 3. Umbrales de precipitación en base a lluvia acumulada en 10 minutos para la cuenca Quebrada Manizales.

	Primer Nivel de alerta	Segundo Nivel de alerta	Tercer Nivel de alerta
Umbrales	11.2	12.8	> 15.2 mm

Mayor Información

Los umbrales se obtuvieron a partir de los puntos de corte generados por los niveles de riesgo sobre la curva (Figura 6) que relaciona la precipitación máxima de cada uno de los hietogramas de diseño y los niveles generados sobre la sección crítica. Estos umbrales se calcularon en base a la precipitación acumulada móvil en 10 minutos, debido a que no se tuvo en cuenta el total de lluvia acumulada de cada evento. En la Tabla 3 se resumen los resultados obtenidos.

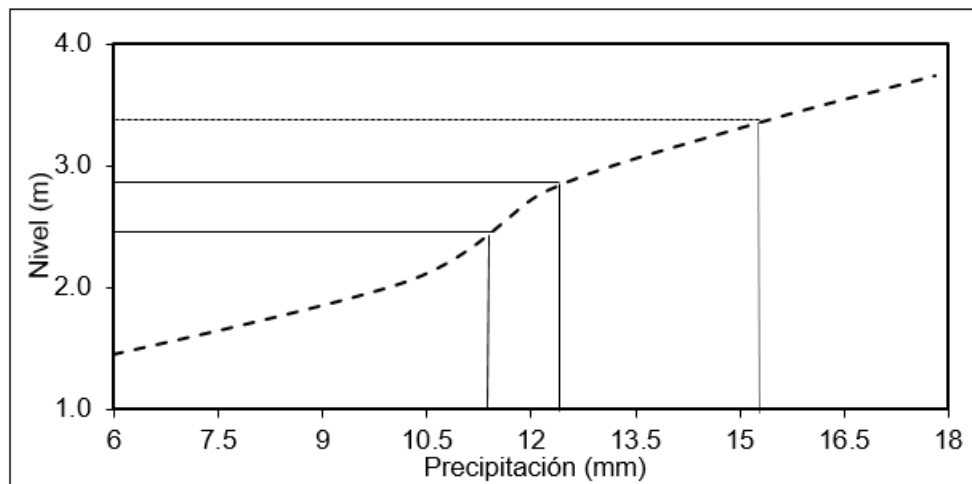


Figura 6. Determinación de umbrales de precipitación para la cuenca de la quebrada Manizales a partir de la evaluación de niveles de riesgo.

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Los umbrales de precipitación que desencadenan las crecidas repentinas se pueden calcular mediante: métodos empíricos, en base a modelos hidrológicos o métodos probabilísticos. Este trabajo se enfocó en la determinación de la precipitación crítica evaluada por medio de un modelo hidrológico distribuido, que además incorporó un modelo hidráulico bidimensional para establecer los umbrales en base a unos niveles de riesgo definidos, sin embargo, no tuvo en cuenta el análisis detallado de las incertidumbres relacionadas con la precipitación que permitan asociar unos valores de confianza a los umbrales calculados (Wu et al., 2015).

Generalmente los umbrales de precipitación están definidos por una cantidad de lluvia acumulada para una duración de evento dado. Sin embargo, el evento del 07 de noviembre de 2017, muestra que la respuesta de la cuenca es muy rápida y por lo tanto el caudal pico se presenta antes de que evento de precipitación finalice; como consecuencia, el tiempo de antelación para emitir las alarmas es demasiado corto y la metodología tradicional de umbrales no se adapta bien para la cuenca, a menos que se utilice modelos de predicción; que requieren información adquirida por un radar meteorológico. (Golian, Saghafian, Elmi, & Maknoon, 2011) evidenciaron esta situación para crecidas torrenciales sobre cuencas pequeñas de respuesta rápida, y plantearon que el cambio de la precipitación en el tiempo es más importante que el total de lluvia acumulada como desencadenante de inundaciones. Por lo tanto, los umbrales de precipitación de este trabajo fueron calculados como la lluvia acumulada móvil en una ventana temporal de 10 minutos.

Finalmente, se espera que estos umbrales preliminares de precipitación se sometan a un periodo de prueba en el SAT de Manizales, para evaluar su desempeño de acuerdo a la metodología propuesta por Manson (1982).

Mayor Información



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, el Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC) y la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).

REFERENCIAS

- AEROESTUDIOS S.A.** (2014). *INFORME DE CAMPO APOYO GEODÉSICO* (Vol. 7701151400). Manizales. Retrieved from http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4010014/Contenidos/Capitulo1/Pages/1.2/121Conceptos_autores.htm
- Aristizabal, M.** (2015). LA QUEBRADA MANIZALES, QUEBRADA AMBIENTALMENTE POR LA LEGALIDAD E ILEGALIDAD DE LOS VERTIMIENTOS. *Summa Luris*, 3(1), 207–233.
- Arturo, L., & Tobón, G.** (2009). *MARGENES DE INUNDACIÓN DE LA QUEBRADA OLIVARES-MINITAS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 5, 10, 25, 50, 100 Y 200 AÑOS*. Manizales.
- Ávila, A. D., Carvajal, Y. E., & Justino, F.** (2015). Representative rainfall thresholds for flash floods in the Cali river watershed, Colombia. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3(6), 4095–4119. <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-4095-2015>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A.** (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 10. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454>
- Candela, A., & Aronica, G. T.** (2016). Rainfall thresholds derivation for warning pluvial flooding risk in urbanised areas. *E3S Web of Conferences*, 7, 18016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160718016>
- Cannon, S. H., Gartner, J. E., Wilson, R. C., Bowers, J. C., & Laber, J. L.** (2008). Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology*, 96(3–4), 250–269. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.03.019>
- Cea, L., & Bladé, E.** (2008). Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. In *Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial* (pp. 1–30). Madrid: CEDEX-Ministerio de Fomento.
- CORPOCALDAS.** (2011). *Plan de Acción Inmediato Cuenca Quebrada Manizales*. Manizales.
- Diakakis, M.** (2012). Rainfall thresholds for flood triggering. The case of Marathonas in Greece. *Natural Hazards*, 60(3), 789–800. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9904-7>
- Georgakakos, K. P.** (1995). REAL-TIME PREDICTION FOR FLOOD WARNING AND MANAGEMENT. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.572.1961&rep=rep1&type=pdf>
- Golian, S., Saghafian, B., Elmi, M., & Maknoon, R.** (2011). Probabilistic rainfall thresholds for flood forecasting: evaluating different methodologies for modelling rainfall spatial correlation (or dependence). *Hydrological Processes*, 25(13), 2046–2055. <https://doi.org/10.1002/hyp.7956>
- Golian, S., Saghafian, B., & Maknoon, R.** (2010). Derivation of Probabilistic Thresholds of Spatially Distributed Rainfall for Flood Forecasting. *Water Resources Management*, 24(13), 3547–3559. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9619-7>
- La Patria.** (2017). Lluvias causan emergencias en el suroriente de Manizales. Retrieved July 19, 2018, from <http://www.lapatria.com/manizales/lluvias-causan-emergencias-en-el-suroriente-de-manizales-396511>

Mayor Información



- Legarda Garzón, L. F.** (2013). *Estudios de Vulnerabilidad y Riesgo de Líneas Vitales de Agua y Saneamiento*. Manizales.
- Mancini, M., Mazzetti, P., Nativi, S., Rabuffetti, D., Ravazzani, G., Amadio, P., & Rosso, R.** (2002). DEFINIZIONE DI SOGLIE PLUVIOMETRICHE DI PIENA PER LA REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI ALLERTAMENTO IN TEMPO REALE PER IL BACINO DELL'ARNO A MONTE DI FIRENZE. In *XVIII convegno nazionale di idraulica e costruzioni idrauliche*, Potenza. Potenza. Retrieved from <http://www.ravazzani.it/wp-content/papercite-data/pdf/mancini2002.pdf>
- Martina, M., Todini, E., & Libralon, A.** (2006). A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 413–426. Retrieved from www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/413/2006/
- Mogil, H. M., Monro, J. C., & Groper, H. S.** (1978). NWS' s Flash Flood warning and Disaster preparedness Programs. *Bulletin American Meteorological Society*, 59(6). Retrieved from <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477%281978%29059%3C0690%3ANFFWAD%3E2.0.CO%3B2>
- Montesarchio, V., Napolitano, F., Rianna, M., Ridolfi, E., Russo, F., & Sebastianelli, S.** (2015). Comparison of methodologies for flood rainfall thresholds estimation. *Natural Hazards*, 75(1), 909–934. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1357-3>
- Moore, R.** (2002). Aspects of uncertainty, reliability and risk in flood forecasting systems incorporating weather radar. In *isk, reliability and uncertainty and robustness of water resources system*. Cambridge University Press.
- National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA.** (2012). *GUÍA DE REFERENCIA PARA SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA DE CRECIDAS REPENTINAS 2012*. (University Corporation for Atmospheric Research, Ed.). Estados Unidos. Retrieved from https://www.meted.ucar.edu/communities/hazwarnsys/ffewsrsg_es/FFG_completa_es.pdf
- Norbiato, D., Borga, M., & Dinale, R.** (2009). Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds. *Meteorological Applications*, 16(1), 65–75. <https://doi.org/10.1002/met.126>
- Ocampo L, O.** (2012). *Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. Retrieved from http://bdigital.unal.edu.co/6100/3/8109507.2012_Parte1.pdf
- Quintero, J. J.** (2013). *Diagnóstico de la gestión integral del riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales en ríos urbanos del departamento de Caldas*. Universidad Católica de Manizales. Universidad Católica de Manizales. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rincón, D. F., Vélez, J. J., & Chang, P.** (2015). SPATIO-TEMPORAL DESCRIPTION OF THE RAINFALL IN THE ANDEAN CITY OF MANIZALES (COLOMBIA) FOR STORM DESIGN. In *36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands* (p. 7). Hague: IAHR.
- Santos, M., & Frago, M.** (2016). Precipitation thresholds for triggering floods in the Corgo basin, Portugal. *Water (Switzerland)*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/w8090376>
- Sene, K.** (2008). *Flood Warning, Forecasting and Emergency Response*. Springer.
- Serna, A.** (2012, April 25). A orillas del riesgo en la quebrada Manizales. *La Patria*. Manizales. Retrieved from <http://www.lapatria.com/en-domingo/orillas-del-riesgo-en-la-quebrada-manizales-1578>
- UNESCO, & OMM.** (2012). *INTERNATIONAL GLOSSARY OF HYDROLOGY*. Chair, Publications Board (Vol. 385). Geneva, Switzerland. Retrieved from <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>
- UNISDR.** (2006). Desarrollo de Sistemas de Alerta temprana: Lista de comprobación. In *EWCHH*

Mayor Información



Tercera Conferencia Internacional sobre Alerta Temprana: Del concepto a la acción (p. 13).
Bonn, Alemania. Retrieved from https://www.unisdr.org/files/608_spanish.pdf

US Army Corps of Engineers. (2010). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*.
Davis. Retrieved from http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf

Vélez, J. J., & Botero, A. (2011). ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES. *Dyna*, 78(165), 58–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622372006>

Vélez, J. J., & Ocampo, O. L. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24). Retrieved from <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/915/1037>

Wu, S. J., Hsu, C. T., Lien, H. C., & Chang, C. H. (2015). Modeling the effect of uncertainties in rainfall characteristics on flash flood warning based on rainfall thresholds. *Natural Hazards*, 75(2), 1677–1711. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1390-2>

Mayor Información