

EVALUACIÓN DE ZONAS DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES UTILIZANDO METODOLOGÍAS CUALITATIVAS. CASO DE APLICACIÓN A LA QUEBRADA DOÑA MARÍA

Luis Javier Montoya Jaramillo*
Sandra Milena Silva Arroyave**
Juan Esteban González***

Recibido: 26/09/2008

Aceptado: 07/05/2009

RESUMEN

En este artículo se presenta la aplicación de una metodología para la evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales, implementada en la cuenca de la quebrada Doña María. Para esta evaluación de amenazas se utilizaron sistemas de información geográfica y la técnica de los residuos ponderados, para evaluar el peso relativo que tenían diferentes factores como la topografía, la pendiente, la geología y geomorfología, la red de drenaje acumulada, la distancia a los cauces y el índice de Melton para cada una de las microcuencas. Los resultados obtenidos permitieron identificar que las microcuencas que mayor amenaza presentaron fueron la Arenala, la Tablaza, la Limona y la Manguala. Se verificó la amenaza obtenida mediante reconocimientos de campo y mediante comparación con los resultados de modelaciones hidráulicas para un caudal de período de retorno de 100 años incrementado en un 40%.

Palabras clave: avenidas torrenciales, zonas de amenaza, quebrada Doña María.

* Ingeniero civil, magister en aprovechamiento de recursos hidráulicos, profesor asistente, Grupo de Investigación y mediciones ambientales GEMA, Universidad de Medellín, Cra 87 No 30-65, ljmontoya@udem.edu.co, 3405216

** Joven investigadora, Grupo GEMA, Universidad de Medellín, Cra 87 No 30-65, smsilva@udem.edu.co, 3405216

*** Profesor catedrático, Grupo GEMA, Universidad de Medellín, Cra 87 No 30-65, jegonzalez@udem.edu.co, 3405216

EVALUATION OF HAZARD ZONES BY TORRENT FLOW USING QUALITATIVE METHODOLOGIES. APPLICATION TO THE CASE OF DOÑA MARIA BASIN

ABSTRACT

This paper shows the application of a methodology for evaluation of hazard zones by torrent flow, it was done at Doña Maria basin. Hazard evaluation was done using geographical information system, and the residual pondered weight method, for the evaluation of different factors as topography, slope, geology and geomorphology, cumulative flow, distance to the rivers and Melton index for each ones to the affluent basin. The results obtained allow to identify that the little basin that more hazard presented were la Arenala, la Tablaza, la Limona y la Manguala. These results also were verified through field recognitions y comparison with the results of hydraulic modeling for a return period flow of 100 years increased in 40%.

Key words: torrent flow, hazard zones, Doña Maria basin

1. INTRODUCCIÓN

Las avenidas torrenciales son fenómenos naturales que aunque tienen una ocurrencia relativamente baja, por su gran potencial destructivo, son de particular interés para evaluar los riesgos naturales a los que se encuentra sometida una determinada cuenca. Entre las razones que existen para que este tipo de evento sea tan dañino están su naturaleza casi impredecible, la rapidez a la cual ocurre, su corta duración y su largo período de retorno así como su distribución poco uniforme en el espacio y el tiempo [1].

En Colombia por las características topográficas de la zona andina, este fenómeno se presenta con una relativa mayor frecuencia. Según INGEO-MINAS “las avenidas torrenciales son una amenaza natural muy común y posiblemente la menos estudiada en Colombia; sin embargo causan grandes pérdidas en vidas humanas e infraestructura. Solamente entre 1985 y 1995, más de 40 avenidas torrenciales altamente destructivas ocurrieron en el país, con más de 200 pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños a viviendas, sistemas de generación de energía, carreteras y tierras cultivables” [1]. Polanco y Bedoya [2], utilizando la base de datos de DesInventar, refieren que en Antioquia (exceptuando los municipios del valle de Aburrá), un 15% de los desastres naturales reportados entre los años de 1920 y 1999 corresponde a avenidas torrenciales.

Para planificar adecuadamente la ocupación del territorio y en particular una cuenca hidrográfica, es necesario tener en cuenta la amenaza asociada a avenidas torrenciales y especialmente en cuencas urbanizadas en las que sus posibles efectos adversos sobre la población, la economía y la infraestructura urbana son muy altos.

Uno de los principales inconvenientes para delimitar la amenaza por este tipo de eventos consiste en la dificultad de predecir su ocurrencia. Entre estos se pueden mencionar:

- En términos generales se cuenta con poco monitoreo y registro sobre eventos de este tipo, lo que dificulta datar adecuadamente los mismos y contar con una escala temporal que permita asociar un período de retorno a los mismos o una probabilidad de ocurrencia.
- El concepto de avenidas torrenciales tiene gran variedad de significados, esto debido a que diferentes disciplinas han trabajado el tema y, por consiguiente, cada uno hace su aporte distinto al concepto.
- Existen diferentes causas que dan origen a una avenida torrencial; entre ellas se pueden mencionar una alta precipitación que genere una serie de deslizamientos, un deslizamiento de gran magnitud que origine represamiento en el flujo, la ocurrencia de sismos que produzcan deslizamientos, o la ocurrencia de erupciones volcánicas.
- Es difícil asociar una probabilidad de ocurrencia a los fenómenos detonantes de las avenidas.
- Normalmente no se cuenta con estimaciones de umbrales entre intensidad de la precipitación y generación de deslizamientos. Los umbrales para la generación de avenidas torrenciales de orígenes diferentes a altas precipitaciones son de difícil definición.
- Los flujos de lodos generados son de difícil modelación. Los parámetros como la densidad de la mezcla, el volumen de sedimentos, el caudal de la avenida son de difícil estimación.
- Estimar el volumen de sedimentos asociados a un evento con cierta probabilidad de ocurrencia puede ser difícil.
- La modelación matemática del fenómeno no se encuentra del todo establecida.

La mayoría de los trabajos realizados en avenidas torrenciales se concentran en estudiar las características de zonas en las que se ha presentado un evento torrencial. González et al. [1] estudian

la avenida torrencial y los movimientos en masa relacionados que ocurrieron el 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile, fenómeno que generó severas consecuencias para los habitantes del poblado de Florida (Valle del Cauca). En dicho estudio se analizaron diversas causas del fenómeno, y se encontró que muchos aspectos geomorfológicos (como el tamaño de la cuenca; el intervalo entre la precipitación y la descarga pico; la forma de la cuenca; la localización en altas montañas con relieves abruptos y clima húmedo; la variabilidad en la descarga; y la red de drenajes) influyeron en la generación del evento.

Se concluyó que la avenida torrencial en el río Fraile en 1994 fue un evento de gran magnitud con un período de retorno posible medido en cientos de años. Algunas características geomorfológicas intrínsecas hacen de esta cuenca un área propensa a la generación de avenidas torrenciales; sin embargo, la ocurrencia de una inundación de grandes proporciones, que deje grandes depósitos torrenciales, requiere una combinación particular de precipitación y de saprolito removido.

Barreto y Ruiz [3] realizan un estudio sobre la amenaza por avenidas torrenciales en el sector noroccidental de la ciudad de Ibagué (departamento de Tolima). Se elaboró un inventario de desastres y se analizó la cronología de los movimientos de masa y las avenidas torrenciales. Con la base cartográfica (ortofotografía y modelo digital del terreno) y trabajo de campo, se levantó información de capas de geología y cobertura de la zona. De igual modo se tomaron muestras de material superficial y del lecho de las quebradas, se corroboró el uso y cobertura del suelo, se realizó un levantamiento topográfico de secciones en los cauces y, al inventariar los procesos denudativos, se obtuvo un mapa de susceptibilidad a movimientos de masa y avenidas torrenciales, el cual fue la base para establecer criterios de calificación de cada uno de los factores dentro de la evaluación.

Se concluyó que las zonas urbana y sub-urbana, al pie de los cerros noroccidentales de Ibagué, pueden ser severamente afectadas por flujos de tierra y avalanchas originados en la zona montañosa, así como por inundaciones. A largo plazo, la posibilidad de daños es mucho mayor ya que aumenta la probabilidad de que sucedan eventos como sismos y lluvias de gran magnitud capaces de detonar deslizamientos más numerosos y de mayor tamaño que los ocurridos en años recientes.

Piedrahíta y Hermelín [4] analizan la avenida torrencial del río Tapartó (municipio de Andes, Antioquia), ocurrida en la noche del 25 al 26 de abril de 1993, la cual dejó depósitos de los flujos de lodos transportados por el río con un espesor promedio de 30 cm y causó socavación del lecho del río. Dichos autores asociaron la ocurrencia de dicho evento a fuertes lluvias de gran intensidad, altas pendientes y desprendimientos de material sólido en la parte alta de la cuenca. Mediante el análisis de 7 depósitos previos en la cuenca, encuentran una recurrencia de estos eventos de 280 años para este tipo de avenidas en el río Tapartó.

Hermelín et al. [5] presentan una descripción de la avenida torrencial de San Carlos (Antioquia) en el año de 1990.

Flores et al. [6] presentan un estudio sobre la cuantificación e identificación de los tipos de movimientos de masa ocurridos en la cuenca experimental de San José de Galipán y su contribución al desastre de Vargas (Venezuela) de 1999.

En una primera etapa se caracterizó el sitio de estudio, se estudiaron las características físicas y humanas de predisposición al riesgo de movimientos de masas y flujos torrenciales, se realizó un trabajo de fotointerpretación, el cual, conjuntamente con visitas de campo y la información geológica recolectada, permitió identificar y cartografiar los diferentes procesos encontrados. Se encontró que la causa principal de estos flujos torrenciales estuvo asociada a los siguientes factores: presencia de altas pendientes, ocurrencia de lluvias de baja intensi-

dad por un período de dos semanas produciendo la saturación de los suelos, un evento extraordinario donde se registró una precipitación acumulada de 911 mm en tres días y la presencia de abundantes sedimentos, rocas meteorizadas, espesores variables de suelos, y caídas de bloques.

Diferentes enfoques se pueden adoptar para enfrentar el problema de estimar zonas de amenaza ante avenidas torrenciales. Una primera alternativa cuando se cuenta con eventos recientes, posibles de reconstruir, es asociar dicho evento a un determinado período de ocurrencia y delimitar las zonas afectadas por el evento. El problema de esto es que no en todas las zonas se cuenta con eventos recientes y en este caso la delimitación sería con el fin de impedir que se ubique población en zonas afectadas, pero no permitiría prevenir a los habitantes ante la ocurrencia de un determinado evento.

Siguiendo la misma idea, una posibilidad es buscar depósitos aluvio-torrenciales en la cuenca y delimitarlos como zonas de riesgo; sin embargo, el hecho de que en el pasado se hayan presentado eventos en un lugar determinado no es garantía de que en el futuro se presenten también (aunque puede ser un buen indicador), pues en la cuenca se podrían haber presentado cambios que faciliten que nuevas zonas se encuentren amenazadas, o que zonas que antes no lo estaban hayan disminuido su amenaza. Además, algunos depósitos podrían haber sido lavados (algunos resultantes de flujos de pequeña magnitud), por lo que se podrían disfrazar algunas zonas. Esta metodología podría ser completada considerando la geomorfología de la cuenca y dando alguna conectividad a los diferentes depósitos. Otra alternativa consiste en la modelación. Suárez [7] considera que dentro de las variables de importancia para la modelación de las avenidas torrenciales se encuentran:

- Análisis de las características geológicas y geotécnicas: se requiere definir el porcentaje y profundidad de denudación de cada subcuenca en el momento de ocurrencia de la precipita-

ción máxima, sismo, aumento de caudales de la corriente, entre otros. El porcentaje de denudación depende de la magnitud de la anomalía, el uso del suelo, la pendiente del terreno y la susceptibilidad a los deslizamientos y/o a la erosión, la cual depende de las características geológicas. La profundidad de denudación depende de la profundidad del perfil de meteorización y de la morfología del terreno.

- Cálculo de los caudales de agua: se estiman los caudales de agua disponible la forma y características del probable hidrograma para la precipitación máxima esperada, suponiendo solamente aportes de agua sin tener en cuenta sólidos. Este análisis requiere de información sobre precipitación, respuesta de las corrientes, uso del suelo y morfología de la cuenca.
- Cálculo del volumen de sedimentos: se calcula el volumen de sedimentos que se incorporaría a la avalancha al momento de la precipitación máxima, especificando el volumen de sedimentos finos y gruesos.
- Cálculo de los caudales de avenida torrencial: se debe realizar para cada sección o punto de control incluyendo la suma de líquidos y sólidos.
- Definición del tipo de fluido: el tipo de fluido depende de la concentración y tipo de sedimentos. El tipo de fluido determina cuál de los modelos matemáticos es el recomendado para la modelación.
- Calibración del modelo: es necesario comparar los resultados del modelo con información histórica de la zona de estudio y con los resultados obtenidos mediante otras metodologías.

Aunque actualmente se encuentra disponible gran cantidad de modelos, con diferentes grados de complejidad, predecir los datos necesarios para alimentarlos es difícil. Sin embargo, la modelación aporta valiosos elementos al monitoreo del comportamiento de las avenidas torrenciales, del

mismo modo que permite una mejor comprensión de los procesos involucrados y apoya la definición de zonas de riesgos.

La modelación matemática hace una contribución importante al mejoramiento en la generación de advertencias por fenómenos peligrosos [8]. Un tercer enfoque, muy cualitativo, es el que se presenta en este artículo, en el cual a partir de sistemas de información geográfica se realiza una ponderación de diferentes factores con el fin de identificar zonas sujetas a mayor probabilidad de amenaza, entendiendo estas como aquellas zonas que recogen mayor número de factores de riesgo. Con el fin de esclarecer un poco el proceso de las avenidas torrenciales se parte de algunas definiciones previas, que permitan delimitar un poco el fenómeno que se piensa estudiar. Luego se describe la metodología empleada, se presentan los resultados de la aplicación y la verificación de estos mediante reconocimiento en campo y de modelaciones hidráulicas.

2. DEFINICIONES PREVIAS

El concepto de avenidas torrenciales tiene gran variedad de significados debido a que diferentes disciplinas han trabajado el tema y por consiguiente cada uno hace su aporte distinto al concepto. En términos sencillos se puede definir una avenida torrencial como “el aumento del caudal en un cauce con volúmenes excepcionales, en el cual, el fluido además de agua contiene una mezcla de escombros compuesta por suelo, roca y material vegetal. Este fenómeno está restringido a cauces relativamente pequeños de ríos de montaña y no se produce en ríos con cuencas grandes, debido a que los agentes naturales que las provocan afectan sólo áreas pequeñas” [9].

De acuerdo con Johnson citado en Castillo [10] se define un flujo de escombros (avenida torrencial con poca agua y alta cantidad de rocas, suelo y escombros) como “una pared de bloques,

rocas de todos los tamaños y lodo húmedo que aparece súbitamente en el fondo de un cañón precedido por un ruido sordo. Mientras la pared pasa el canal permanece lleno, con un torrente de escombros compuestos de lodo y bloques, rodando, chocándose y moliéndose entre sí. Cuando llega a un abanico aluvial arrasa estructuras, vehículos y cubre carreteras, cultivos y campos como un tapete de escombros que lentamente se va deteniendo dejando un montículo frontal”.

Suárez [7] considera que una avenida torrencial es “el fenómeno de erosión en masa que incluye el desprendimiento, transporte y depositación de grandes masas de suelo, por acción del agua. Las masas en movimiento se comportan como un fluido pero su comportamiento es diferente al de los flujos de sedimentos, especialmente debido a la alta concentración de sólidos”. Una terminología común para clasificar las avenidas torrenciales se basa en criterios físicos que tienen en cuenta la viscosidad y la turbulencia del flujo. De acuerdo con este criterio los flujos se dividen en tres categorías: flujos de lodo, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos.

Según la base de datos de Desinventar de la Corporación Osso [11] “una avenida torrencial es un flujo violento de agua en una cuenca, a veces reportado como creciente (súbito, rápido), o como torrente”. Se aplica cuando “la avenida transporta troncos de árboles y/o abundantes sedimentos desde finos hasta bloques de roca”. “Pueden ser generados por lluvias, por ruptura de represamientos o por abundantes deslizamientos sobre una cuenca. Excluye los aludes porque estos implican desprendimiento de hielo o nieve”.

Piedrahíta y Hermelín [4] presentan la siguiente definición: “los eventos hidrológicos torrenciales consisten en la ocurrencia súbita de caudales pico de corta duración y gran velocidad, que transitan a lo largo de canales en cuencas hidrográficas de montaña, normalmente de tamaño reducido”.

Origen y causas de las avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales se generan por causas hidrometeorológicas (lluvias concentradas), sísmicas (enjambres de deslizamientos cosísmicos), de inestabilidad de vertientes (bloqueo de un cauce por un deslizamiento y posterior ruptura del dique), o por erupciones volcánicas y deshielo o por acumulación de capas gruesas de cenizas sueltas. Las avenidas torrenciales también se pueden presentar por otras causas como son deshielo al final del invierno o lluvias concentradas asociadas a ciclones tropicales [9].

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca de la quebrada Doña María está localizada en el departamento de Antioquia en la zona centro, al sur occidente de la cuenca del río Aburrá, en la ladera occidental del valle, entre los municipios de Medellín, Itagüí y La Estrella. La cuenca tiene un área aproximada de 75,82 km², y es uno de los principales tributarios al río

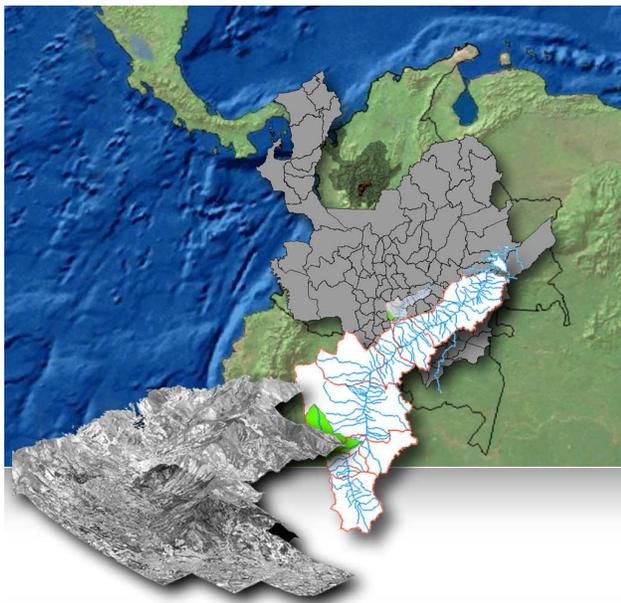


Figura 1. Localización geográfica de la microcuenca de la quebrada Doña María.

Fuente: AMVA y CTA [12]

Aburrá (también llamado río Medellín). Tiene su nacimiento en la vereda Astilleros (sur occidente del municipio de Medellín, corregimiento de San Antonio de Prado) y su desembocadura al río Medellín está ubicada en el municipio de Itagüí. En la parte alta y media de la quebrada se encuentra el corregimiento de San Antonio de Prado (municipio de Medellín) y en la parte baja se encuentra el municipio de Itagüí. La figura 1 presenta la localización geográfica de la cuenca de la quebrada Doña María.

Los principales parámetros geomorfológicos para la cuenca de la quebrada Doña María se presentan en la tabla 1, en la cual se destacan sus altas pendientes.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la quebrada Doña María

Parámetro	Valor
Área de la cuenca [km ²]	75,82
Orden de Horton - Strahler	5
Magnitud	1371
Longitud total de canales [km]	229,14
Longitud del canal principal [km]	25,84
Cota máxima de la cuenca [m]	3105
Cota en la salida de la cuenca [m]	1522
Distancia al centroide [km]	13,43
Perímetro [km]	49,075
Pendiente media [%]	57,69
Pendiente promedio del canal principal [%]	5,57

Fuente: AMVA y UNAL [13]

Se tienen registros de eventos con características de avenidas torrenciales recientes en algunas microcuencas afluentes como la Limona, la Manguala, la Justa, la Ospina y la Cabuyala, las cuales presentan fajas de material torrencial, circunscrito a los cauces activos de los afluentes mayores [14], con eventos recientes de tipo torrencial reportados para el caso de la Cabuyala (16 de junio de 1990).

El estudio realizado por AMVA y UNAL [13], hace mención a la presencia de depósitos de tipo aluvio-torrencial en la quebrada la Candela, la Limona, y la Manguala, y de depósitos intercalados (intercalación de depósitos de flujos de lodos, de flujos de escombros, aluviotorrenciales, y aluviales, en zonas deprimidas), en quebradas como la Macana, y la Manguala.

4. DATOS Y MÉTODOS

Para el estudio de las avenidas torrenciales y la definición de los niveles de amenaza ante dicho evento, se empleó una metodología basada en el análisis multicriterio de diversos parámetros que dan razón de la posible intensidad de una avenida torrencial. Hay que aclarar que la amenaza por avenidas torrenciales integra gran cantidad de fenómenos hidrológicos, físicos, hidráulicos, entre otros, y en general una descripción completa de todos estos fenómenos es compleja, por lo que se presenta una metodología que intenta combinar diferentes factores para, de forma general, identificar posibles zonas de amenaza por avenidas torrenciales en una cuenca, que serían donde varios factores se combinan. No se pretende dar una descripción completa del fenómeno o realizar un análisis absoluto del mismo, así que las zonas obtenidas mediante esta metodología deben ser interpretadas simplemente como referencias de análisis para un manejo de las mismas.

La metodología utilizada se basa en el método presentado por Ordóñez y Martínez [15], quienes proponen analizar riesgos naturales (identificación de zonas de amenaza por inundaciones y por deslizamientos) mediante los sistemas de información geográfica, utilizando técnicas de análisis multivariado. Para la aplicación de este modelo se empleó el software *IDRISI Kilimanjaro*, el cual tiene la capacidad de superponer varias capas temáticas con el fin de obtener un resultado a partir de dife-

rentes condiciones, además, permite calcular pesos relativos a cada una de las variables a considerar en el desencadenamiento de las avenidas torrenciales.

La propuesta parte de la combinación de diversos parámetros previamente normalizados y se basa en la forma como dichos parámetros afectan, de forma individual, la intensidad de un evento torrencial. Dichos mapas normalizados, se combinaron mediante un sistema de pesos ponderados, donde los valores de dichos pesos relativos se obtuvieron a partir de un análisis jerárquico, entre las diferentes parejas de parámetros considerados. Se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros considerados dentro del proceso de evaluación multicriterio, del cual se obtuvo un grupo último de pesos relativos a considerar. Los límites de los niveles de amenaza empleados se definieron teniendo en cuenta un análisis de zonas críticas evidenciadas a partir del ejercicio de sensibilidad antes mencionado. Los resultados finales se cotejaron con la información histórica disponible, y con información de campo, para verificar la pertinencia de los resultados. A continuación se describe el manejo de cada variable:

Para el caso de la cuenca de la quebrada Doña María, se utilizó el modelo digital de elevación (MDE), el mapa de geología y geomorfología, la red de drenaje acumulada, el mapa de pendientes, el mapa de distancia a los cauces y el mapa con el índice de Melton para las microcuencas presentes en la zona de estudio [13].

4.1 Factores considerados en la ponderación

El modelo digital de elevación (MDE) es un mapa que se obtiene a partir de la cartografía de la zona de estudio, y consiste básicamente en construir un mapa digital en el cual, por medio de una extrapolación o interpolación de las curvas de nivel presentes en el mapa cartográfico, se permite a cada píxel adoptar un valor sobre la altura del

terreno; de esta forma se obtiene un mapa con las diferentes elevaciones presentes para este caso en la cuenca de la quebrada Doña María. Para el estudio se empleó un tamaño de píxel de 10 x 10 metros.

La red de drenaje acumulada se obtiene a partir del MDE mediante la opción Flow la cual permite, a medida que el cauce se dirige a su desembocadura, acumular el número de celdas que descarguen en dicho punto. Se quiso con este temático asignar a cada píxel en la microcuenca un peso de acuerdo con la cantidad de puntos que descargasen en ella y luego, mediante el proceso de normalización para la red de drenaje, se asignó una calificación mayor a los puntos en que drenarán un mayor número de celdas. El índice de Melton se calculó para las microcuencas que conforman la quebrada Doña María clasificando la torrencialidad de cada una de ellas; este cálculo hace parte del mapa de microcuencas. Hay que aclarar que este índice no fue diseñado para cuencas en zonas ecuatoriales; sin embargo, se utilizó como índice de torrencialidad. Para cada microcuenca se empleó la siguiente ecuación:

$$\text{índice de Melton} = (H \text{ max} - H \text{ min}) \times S^{-0.5} \quad (1)$$

Donde Hmax y Hmin (en km) son la cota de altura máxima y mínima de la microcuenca y S, es el área de la microcuenca expresada en km². Una microcuenca presenta torrencialidad cuando el índice de Melton presenta valores superiores a 0.5 según [16]. Para esta capa temática se realizó un análisis para comparar la torrencialidad entre las microcuencas. Dicho análisis se hizo aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Comparación Torrencialidad} = \frac{(IMi - M \text{ min})}{(M \text{ max} - M \text{ min})} \quad (2)$$

Donde: IMi = índice de Melton de la microcuenca

IM min = Valor Mínimo del índice de Melton de todas las microcuencas

IM max = Valor Máximo del índice de Melton de todas las microcuencas

Se le dio entonces mayor importancia a aquellas microcuencas que presentan valores altos según el índice de Melton; de esta forma, dichas microcuencas tendrán mayor relevancia al momento de ejecutar el modelo.

4.2 Funciones de normalización y transformación

Los factores considerados para la ponderación tienen diferentes unidades y representan otros efectos, por lo que no se puede hacer una comparación directa entre ellos. Para poder combinarlos, es necesario llevarlos todos a una escala común. En este caso se llevarán todas las variables a una escala entre 0 y 1, donde 0 representa un valor en el cual la variable no favorece la generación de amenazas por avenidas torrenciales y 1 un valor en el cual el favorecimiento de amenazas por avenidas torrenciales sería muy alto.

Además de asignar valores entre 0 y 1, se quiere representar el comportamiento de la variable, de tal forma que sea consistente y si al aumentar una determinada variable se aumenta el favorecimiento de la amenaza, entonces el índice se debe aumentar y si, por contrario, al aumentarlo, se disminuye el índice, debe disminuir. Para facilitar este proceso de normalización, se utilizaron funciones sigmoideas crecientes o decrecientes, como las presentadas en la figura 2. Dichas funciones permiten asignar umbrales inferiores y superiores y presentan un comportamiento más o menos lineal en zonas intermedias, permitiendo ajustar lo más aproximadamente posible el comportamiento de las variables a la ocurrencia del evento. Por ejemplo, en el caso de la pendiente (para este estudio en específico) cuando ésta tiene valores superiores al 70%, la probabilidad de ocurrencia es casi nula (se califica con 0); cuando la pendiente varía entre 5% y 70% la amenaza aumenta casi de forma lineal; pero cuando se presentan valores inferiores a 5% la amenaza es alta y, por consiguiente, se adopta un valor de 1.

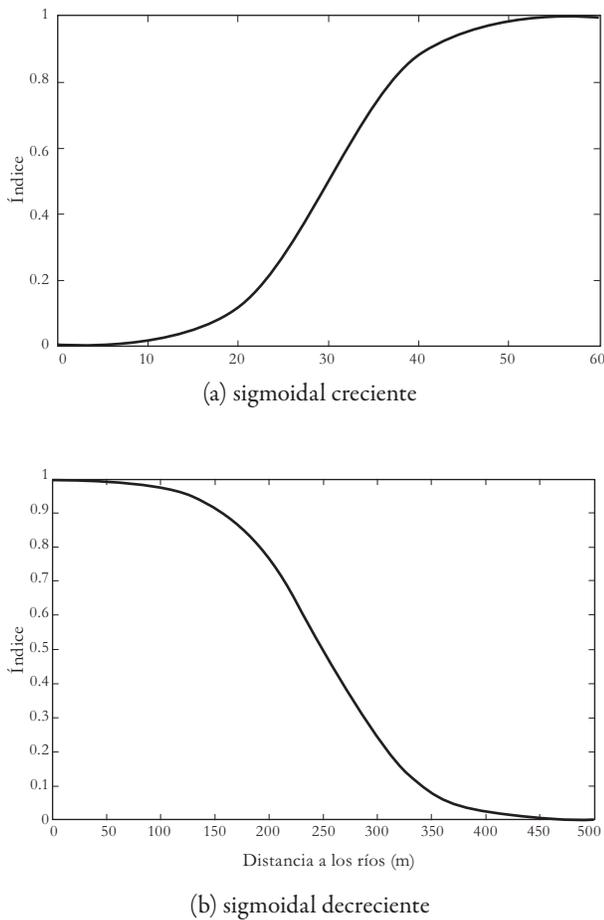


Figura 2. Función sigmoidal decreciente

Fuente: elaboración propia adaptada de [15]

La tabla 2 presenta las capas temáticas que se normalizaron, el rango en el que se realizó la normalización y la función aplicada en el proceso.

Tabla 2. Funciones matemáticas empleadas en la normalización

Capa Temática	Rango de Valor	Función matemática
Pendiente	0 - 1	Sigmoidal decreciente
Red de drenaje acumulada	0 - 1	Sigmoidal creciente
Distancia a los cauces	0 - 1	Sigmoidal decreciente

Fuente: elaboración propia

Para normalizar la amenaza de las capas temáticas de geología, geomorfología e índice de Melton de la microcuencas, no se aplicó ninguna función matemática, pues se tenían pocos valores y se procedió a calificar cada una de sus características de acuerdo con el rango establecido para todas las capas temáticas (0-1) según el criterio de expertos en el tema.

4.3 Evaluación multicriterio

Para evaluar las zonas de amenaza se realiza una ponderación entre los diferentes factores, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$M = \sum p_i \cdot x_i \tag{3}$$

Donde: M = índice de amenaza

p = pesos asignados a cada factor

x = factores

El análisis se realiza mediante la aplicación MCE (evaluación multicriterio) la cual permite introducir las capas temáticas y sus pesos relativos y el programa de forma automática realiza el álgebra de mapas. El resultado que arroja la evaluación multicriterio es un mapa con valoraciones entre 0 - 1, donde 0 significa la mínima amenaza por avenidas torrenciales mientras que 1 es la máxima amenaza del mencionado evento.

4.4 Asignación de pesos relativos

Para la ocurrencia de avenidas torrenciales intervienen diferentes variables, sin embargo, el aporte de cada una de ellas en el desencadenamiento del evento no es igual, es posible que algunas variables sean más relevantes que otras. Por tal motivo, es necesario determinar cuáles son las variables con mayor y menor importancia en la ocurrencia del fenómeno en estudio. Como herramienta de ayuda para la toma de esta decisión, el software IDRISI Kilimanjaro posee una función de ponderación denominada comparación por pares,

Tabla 3. Escala de Valoración de pesos relativos

Valoración	Significado
1/4	El factor fila es moderadamente menos importante que el factor de la respectiva columna.
1/6	El factor fila es moderadamente menos importante que el factor de la respectiva columna.
1/9	El factor fila es extremadamente menos importante que el factor de la respectiva columna
1	Igual importancia del factor de la fila y de la columna
4	El factor fila es moderadamente más importante que el factor de la respectiva columna
6	El factor fila es fuertemente más importante que el factor de la respectiva columna
9	El factor fila es extremadamente más importante que el factor de la respectiva columna

Fuente: Valores establecidos en el software *IDRISI Kilimanjaro*, [15]

la cual permite, de forma cuantitativa, identificar cuál o cuáles son las variables con mayor peso en la ocurrencia. Este modelo consiste en una matriz de doble entrada donde se listan, tanto en filas como en columnas, las capas temáticas. El análisis de valoración se hace confrontando la relevancia del factor fila respecto al factor columna. La tabla 3 presenta dicha escala de valoración.

Se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes ponderaciones, con el fin de comparar la sensibilidad frente a diferentes ponderaciones; para ello se generaron seis escenarios diferentes. En la tabla 4, se presentan los valores de ponderación empleados para obtener dichos escenarios.

Tabla 4. Valores de ponderación empleados

Capa temática	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Pendiente normalizado	0.1667	0.3093	0.3581	0.2	0.5058	0.1683
Red de drenaje normalizado	0.1667	*	*	*	*	*
Microcuencas normalizado	0.1667	0.1048	0.1145	0.2	0.1640	0.4944
Geología normalizado	0.1667	0.4129	0.3581	0.2	0.0829	0.1662
Geomorfología normalizado	0.1667	0.0487	0.0490	0.2	0.0462	0.0394
Distancias a los cauces	0.1667	0.1243	0.1202	0.2	0.2011	0.1317
Σ	1	1	1	1	1	1

* La capa temática no fue implementada en el modelo
Fuente: elaboración propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis cualitativo de las zonas de amenaza

Con las diferentes ponderaciones ensayadas se obtuvieron 6 mapas de amenaza; para comparar

resultados entre dichos mapas, se seleccionaron 4 puntos de control en diferentes zonas de la cuenca. Un resumen de los escenarios ensayados se presenta en la tabla 5, donde se enuncian las características de los mapas de amenaza generados.

Tabla 5. Características de las ponderaciones utilizadas

Escenario	Características
Escenario 1	Se emplearon las seis variables de análisis (modelo digital de elevación MDE, geología, geomorfología, red de drenaje, microcuencas, pendiente, distancia a los cauces) con un valor de ponderación igual para todos.
Escenario 2	No se tuvo en cuenta la capa de la red de drenaje, ya que ésta incidía fuertemente en la identificación de las zonas de avenidas torrenciales y las asocia a la red hídrica. Para este caso se dio mayor importancia a la capa de geología.
Escenario 3	No se tuvo en cuenta la capa de la red de drenaje y se dio mayor importancia tanto a la geología como a la pendiente, por consiguiente sus pesos ponderados fueron los más altos e iguales.
Escenario 4	No se tuvo en cuenta la capa de la red de drenaje y se le asignan pesos ponderados iguales a todas las demás capas temáticas, con el fin de identificar la influencia de la red de drenaje en el análisis de amenaza.
Escenario 5	Se dio mayor importancia a la capa de pendientes, mientras que a la capa de geología se le dio menor importancia en la ponderación.
Escenario 6	Se asignó mayor peso de ponderación a la capa microcuencas (índice de Melton) con el objetivo de conocer la importancia de dicha capa en la ocurrencia de avenidas torrenciales.

Fuente: elaboración propia

En la figura 3 se presentan los mapas de amenaza obtenidos con los escenarios de ponderación 1 y 6.

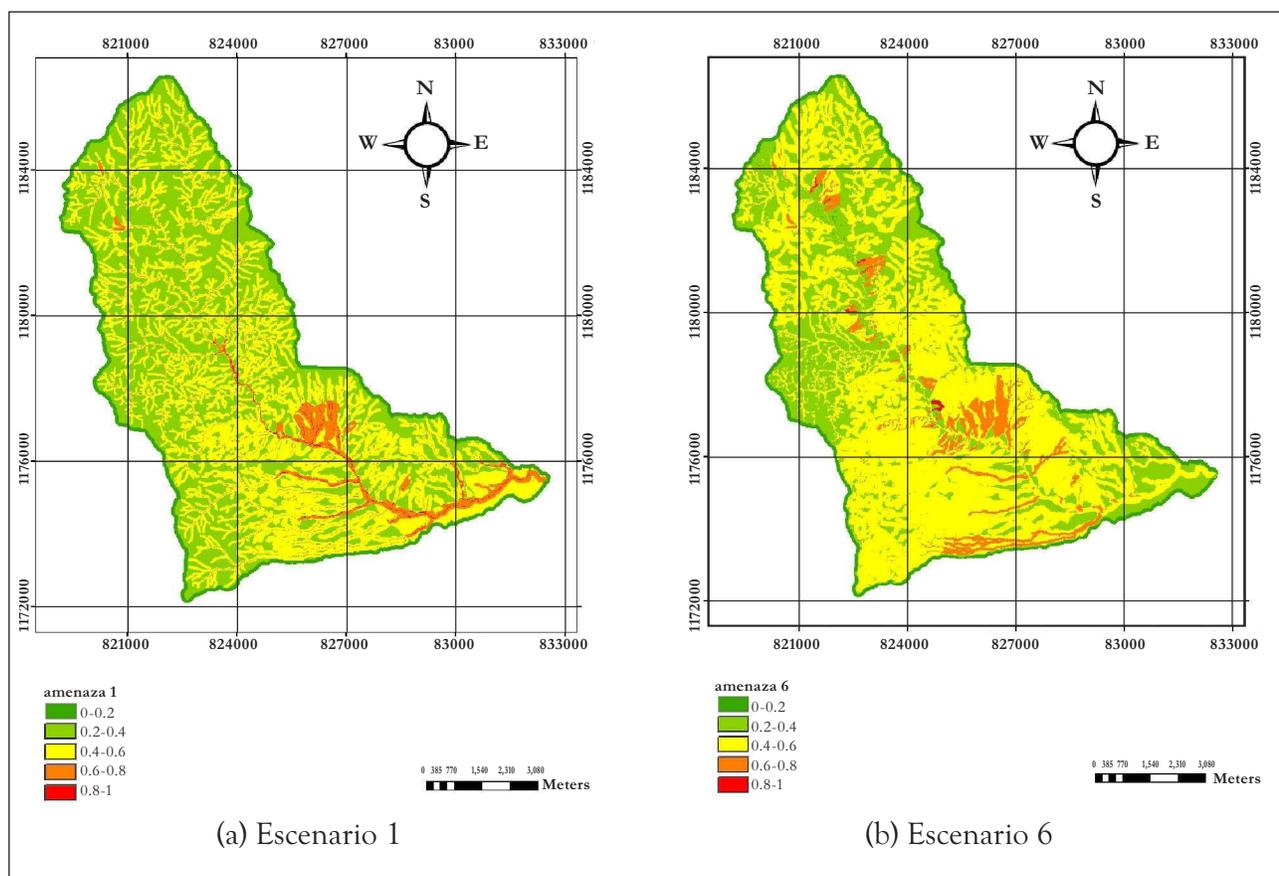


Figura 3. Mapas de amenaza con los escenarios de ponderación 1 y 6

Fuente: AMVA y CTA [12]

Tabla 6. Valores de amenaza para diferentes puntos de control en la cuenca de la quebrada Doña María

Punto de control	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
Punto 1 confluencia quebrada Astilleros con la quebrada Doña María	0.6384	0.6639	0.6890	0.7370	0.7450	0.4046
Punto 2 confluencia quebrada La Manguala con la quebrada Doña María	0.9291	0.9192	0.9239	0.9040	0.9045	0.6549
Punto 3 confluencia quebrada La Tablaza con la quebrada Doña María	0.7691	0.9317	0.9272	0.8510	0.8514	0.5285
Punto 4 parte baja de la quebrada Doña María, cercana su desembocadura al río Medellín	0.5787	0.8082	0.7961	0.5854	0.6146	0.3901

Fuente: elaboración propia

Los resultados de la evaluación y comparación de los valores del índice de la amenaza se presentan en la tabla 6; es posible observar que no existe una variación importante en los valores obtenidos en los puntos 1, 2 y 3, salvo en el caso del mapa de amenaza 6 (mayor importancia el índice de Melton), donde se presenta una disminución considerable de la cuantificación de la amenaza, indicando que el proceso de evaluación es sensible a la manipulación de dicho parámetro. Para el caso del punto 4, se observó una gran sensibilidad a la variación del nivel de importancia de los parámetros considerados, y se obtuvieron los valores de amenaza más elevados, cuando se asumió la geología como el parámetro de mayor importancia en el análisis. El menor valor se obtiene cuando el índice de Melton posee la mayor importancia. Se observó también, que la red de drenaje no influye de una manera considerable en la valoración de la amenaza, y que en los puntos de control, es indiferente su inclusión o no en el proceso de análisis.

En la tabla 6 se puede observar que para el escenario seis, los valores de amenaza son más bajos y muy diferentes en relación con los otros; esto indica que el Índice de Melton (variable con mayor ponderación para este mapa) está disminuyendo considerablemente la amenaza en toda la cuenca.

Para los puntos de control 1 y 2 los valores de amenaza para cada mapa son muy similares; esto indica que las zonas altas y parte de la media no son muy sensibles a los cambios en las variables de análisis y a los pesos de ponderación. En los puntos de control 3 y 4 se logra observar la influencia de las variables de análisis empleadas en el análisis y los pesos de ponderación. Los mapas de amenaza 2 y 3 presentan los valores máximos de amenaza lo que indica que los mapas temáticos de geología y pendiente están incidiendo considerablemente en la ocurrencia de las avenidas torrenciales, mientras que otras variables como la red de drenaje y la geomorfología no son tan relevantes.

Como resultados finales de este cuadro, se observa que la amenaza por avenidas torrenciales está muy localizada en la parte media-baja de la cuenca de la quebrada Doña María, coincidiendo con las zonas donde se encuentran los depósitos y donde las pendientes favorecen la depositación de materiales. En la parte media-alta de la cuenca, aunque pueden presentarse zonas muy pequeñas con valores de amenaza altos, no son muy representativos y de forma general se puede decir que la ocurrencia de avenidas torrenciales es muy baja en comparación con la zona baja de la cuenca.

Aunado a lo anterior y tomando como base las evidencias históricas evaluadas en la literatura disponible para la zona en estudio, cotejando las mismas con los resultados obtenidos del mapa de amenaza 1, en cuanto a la distribución espacial de las zonas con mayor valor de la amenaza, en la escala de 0 a 1, y su posición en los rangos estudiados en el histograma de la figura 6 (abscisas rangos de valores de amenaza; ordenadas, porcentaje de pixeles pertenecientes a un rango específico), se seleccionaron los rangos de valores de 0 a 0.5 como de amenaza baja (94.87% del área de la microcuenca), de 0.5 a 0.7 como de amenaza media o moderada (3.84 % del área de la microcuenca), y de 0.7 a 1 como de amenaza alta por avenidas torrenciales (1.29% del área de la microcuenca), obteniéndose así el mapa de las zonas con amenaza por avenida torrencial, para la microcuenca de la quebrada Doña María, resultante de la metodología de análisis multivariado; ahí se observa que la zona de amenaza alta la comprende la quebrada Doña María en el tramo que fluye por la llanura aluvial de la misma; las quebradas la Arenala, y la Tablaza, en su tramo medio-bajo; las quebradas la Isabela, la Cascada, y la Montañita (sobre la margen izquierda), y las quebradas la Limona, la Cabuyala, la Manguala, y el tramo final de la Justa, y de la Muñoz, y una proporción importante de cauces con amenaza media o moderada, en la vertiente sur de la quebrada Doña María (margen derecha),

lo que está de acuerdo con lo expuesto por Mi Río et al. [14] en cuanto que las corrientes ubicadas en la margen derecha, son las que presentan historial de eventos torrenciales en la microcuenca.

Porcentaje de la Cuenca en Amenaza Alta
Mapa de Amenaza 1

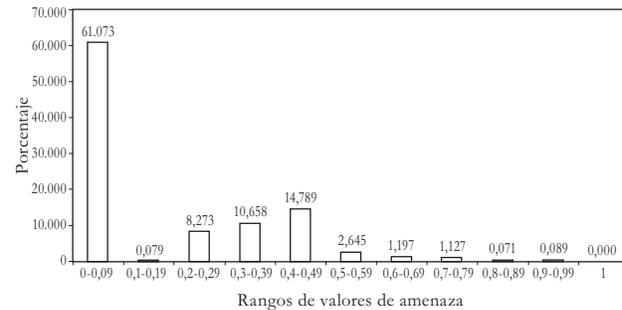


Figura 4. Histograma de distribución de pixeles de la microcuenca Doña María, para diferentes rangos de valoración de la amenaza, en el mapa de amenaza 1

Fuente: AMVA y CTA [12]

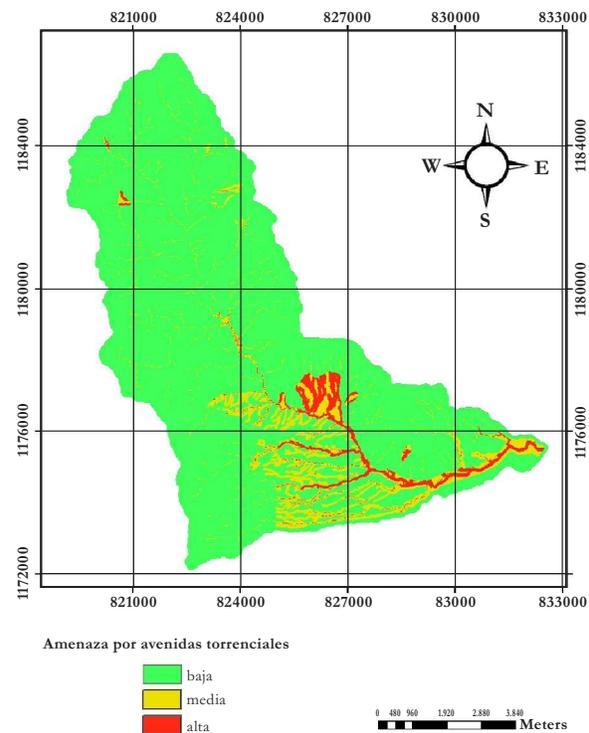


Figura 5. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales, metodología de análisis multicriterio

Fuente: AMVA y CTA [12]

5.2 Verificación de los resultados

Con el fin de comparar la validez de los resultados se empleó un modelo de tránsito hidráulico, en estado uniforme y permanente (con el modelo HEC-RAS), con el fin de simular bajo ciertas consideraciones, el flujo de una posible avenida torrencial, en la red de drenaje que conforma la cuenca. Para dicha modelación se realizó un incremento de un 40% en el caudal con un período de retorno de 100 años, se estimó un coeficiente de rugosidad de Manning de acuerdo con los valores de este coeficiente [7] y empleados en China para modelar avalanchas. Dichos valores están en función del tipo de flujo, de las características del cauce (material de lecho y alineamiento del mismo), de la pendiente media del cauce, y de la profundidad del flujo. Para el caso de la microcuenca de la quebrada Doña María, se emplearon los datos correspondientes a un flujo con predominio de partículas gruesas, para un canal con curvas y gradas, con un material del lecho conformado por piedras de diámetro medio entre 0.3 y 0.5 m, con pendientes medias del cauce entre el 8% y el 15%. El valor de la profundidad de flujo, se obtuvo de una corrida preliminar del modelo, para las condiciones propuestas para estudiar la creciente con período de retorno de 100 años, en lo referente a la asignación por la amenaza por inundación. Así, se asumieron valores del coeficiente de rugosidad, del orden de los 0.1, 0.125, 0.167, y 0.25, para profundidades cercanas a los 0.5 m, 1 m, 2 m, y 3 m, respectivamente. Adicionalmente, se emplearon

las condiciones de fronteras determinadas para el modelo hidráulico de la microcuenca, empleando un régimen de flujo subcrítico, el cual se evaluó teniendo como referente, el no superar velocidades del orden de los 8 m/s (velocidad media para un flujo de detritos [17]).

Para asignar el nivel de amenaza sobre la red de drenaje modelada, se empleó el criterio expuesto por López et al. [18], el cual fue empleado en la región de Cerro Grande en Venezuela, teniendo como base, los datos colectados a partir de la tragedia provocada por los flujos de detritos ocurridos en el Estado de Vargas en 1999. Se implementó la propuesta para un período de retorno del orden de los 100 años, donde para una intensidad del fenómeno alta, se obtiene un nivel de amenaza alto, para una intensidad del fenómeno media, se obtiene un nivel de amenaza medio, y para una intensidad del fenómeno baja, se obtiene un nivel de amenaza bajo. La intensidad del fenómeno en la zona catalogada como la llanura aluvial de la quebrada Doña María se estimó a partir de la tabla 7, empleando los ráster de profundidad y velocidad para dicha zona. Para el resto de la red de drenaje, se determinó como zona de amenaza alta, la correspondiente al dominio de la mancha de inundación, para las condiciones especiales de modelación, siguiendo así, el criterio expuesto en Mi Río et al. [14] para la determinación del nivel de amenaza alta ante inundación, para un período de retorno de 100 años.

Tabla 7. Valoración de la intensidad de un flujo de lodo o de un flujo de escombros

Grado de intensidad	Profundidad máxima (h en metros)	Condicional	Producto de la velocidad máxima (v), y la profundidad máxima (h) (m ² /s)
Alta	> 1	ó	$vh > 1$
Media	$0.2 < h < 1$	y	$0.2 < vh < 1$
Baja	$0.2 < h < 1$	y	$0.2 < vh < 1$

Fuente: elaboración propia

Se evaluó el nivel de amenaza, considerando el dominio de la mancha de inundación, como la zona de amenaza alta por avenidas torrenciales, excepto en el tramo correspondiente a la llanura de inundación de la quebrada Doña María, donde se utilizó el criterio de comparación de la profundidad máxima del flujo versus el producto de dicha profundidad, con la velocidad máxima del flujo, propuesto por López et al. [18] y se obtuvo, así, el mapa de amenaza por avenidas torrenciales, a partir de la modelación. En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos.

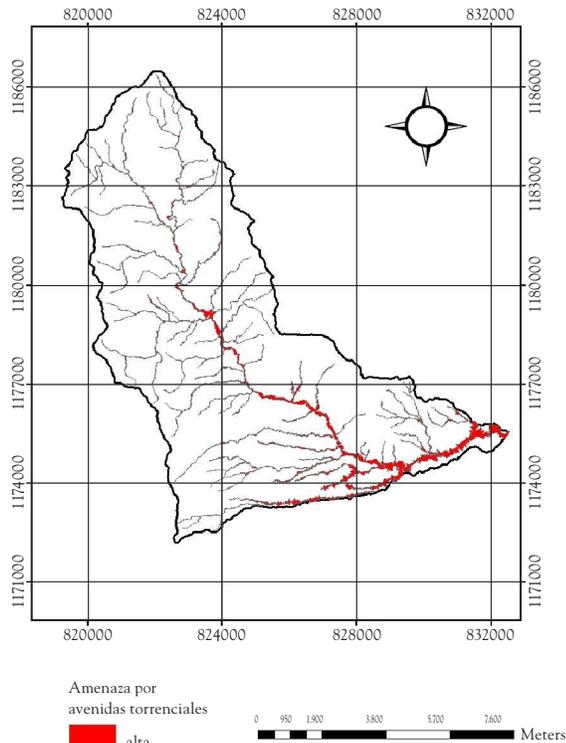


Figura 6. Zonas de amenaza por avenidas torrenciales, a partir del modelo de tránsito hidráulico HEC-RAS

Fuente: AMVA y CTA [12]

5.3 Combinación de los resultados

En la figura 7 se presenta una combinación de los resultados de la evaluación multicriterio y del modelamiento hidráulico. En esta se puede ver

que en la llanura aluvial los datos coincidieron más o menos bien, pero que el modelo hidráulico no representaba las zonas presentadas por el modelo multicriterio para las zonas de montaña, pues el primero consideró solamente la inundación generada y no los deslizamientos asociados. La figura 7 presenta una combinación de los resultados, donde en la zona de montaña, y de piedemonte, se acogió la evaluación obtenida a partir de la evaluación multicriterio, y en la zona correspondiente a la llanura aluvial de la quebrada Doña María, se agregaron ambos resultados, teniendo como criterio el dominio de la amenaza alta, sobre la amenaza media y baja; así, se obtuvo el mapa (a asignación) final de la amenaza por avenida torrencial.

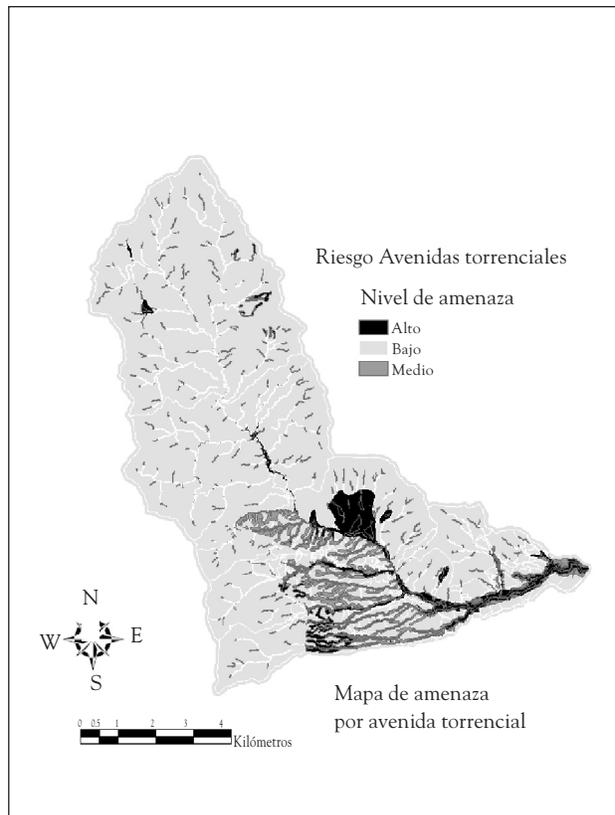


Figura 7. Asignación final de las zonas de amenaza por avenidas torrenciales, en la microcuenca de la quebrada Doña María.

Fuente: AMVA y CTA [12]

De la figura 7 hay que mencionar que la metodología asignó como amenaza alta algunos sitios en donde no se poseen registros históricos de avenidas torrenciales (especialmente en las quebradas la Isabela, La Montañita, y la Cascada), sin embargo, dichos resultados pueden ser evidencia de zonas que muestran un potencial importante a desencadenar y sufrir los efectos de eventos de tipo torrencial, que deben ser corroborados por estudios de geomorfología fluvial y estratigráficos antes de planificar el uso de dichas zonas, pues en ellas se presenta la unión de factores que propician la aparición de eventos torrenciales.

5.4 Recolección de evidencias en campo

Con el fin de constatar en campo las tendencias mostradas por los modelos, se realizó un reconocimiento a las zonas evaluadas como de amenaza alta por el análisis multicriterio, estas fueron las quebradas la Arenala, la Tablaza, la Limona, y la Manguala.

La quebrada la Tablaza se encuentra en la parte baja de la microcuenca de la quebrada Doña María, y desemboca a ésta en cercanías de la empresa Cur-

timbres de Itagüí. En la parte baja de este afluente, se aprecia una cantidad de rocas de diámetros del orden de los 0.5 m (que no corresponden a residuos del lavado de la matriz, figura 8a), que por su forma, tamaño, textura, estructura, etc., son indicativas de la gran competencia de la quebrada, y dan pie a pensar que dichas partículas pudieron haber sido depositadas por eventos del tipo torrencial. En la quebrada la Limona, la cual se encuentra en la parte media de la microcuenca, sobre la margen derecha, de la quebrada Doña María, se observó la presencia de rocas de tamaño considerable (figura 8b) lo que posiblemente indica que estas han sido transportadas por eventos extraordinarios, tal vez del tipo torrencial, apoyado esto en las evidencias reportadas de depósitos aluvio-torrenciales en las proximidades del cauce activo de la quebrada.

Del trabajo de campo antes descrito, se evidenció de forma general, que dichas corrientes presentan indicios sobre el cauce activo, evidencias de un comportamiento torrencial, y son candidatas a ubicarse en el rango de la amenaza alta a moderada, comportamiento similar al obtenido previamente.



Figura 8. (a) Quebrada la Tablaza, detalle material depositado en el lecho del cauce.
(b) Quebrada la Limona, detalle material del lecho

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado la aplicación de una metodología cualitativa de valoración de zonas de amenaza por avenidas torrenciales, en la cual mediante ponderación de diferentes factores como la topografía, la pendiente, la distancia a los cauces, el flujo acumulado, la geología y la geomorfología y el índice de Melton para la microcuenca, se identifican zonas de amenaza a avenidas torrenciales. A pesar que se contaba con poca información para el estudio de la quebrada Doña María, fue posible realizar un análisis en el que se obtuvieron resultados acordes a las evidencias históricas, y a las condiciones actuales de los cauces estudiados en corrientes como la Limona, la Manguala, la Justa, y la Cabuyala, en lo que a asignación del nivel de amenaza se refiere.

7. AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA) a través del convenio interinstitucional Cátedra del Agua, quienes fueron los líderes del proyecto "Plan de ordenación y manejo de la microcuenca de la quebrada Doña María" que permitió la realización de este trabajo. A las otras entidades involucradas en el proyecto, particularmente al Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

REFERENCIAS

- [1] J. González, O. Chávez, and M. Hermelín, «Aspectos geomorfológicos de la avenida torrencial del 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados,» *Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004*, M. Hermelín, ed., Medellín: Universidad Eafit, 2005.
- [2] C. Polanco, and G. Bedoya, "Compilación y análisis de los desastres naturales reportados en el departamento de Antioquia exceptuando los municipios del Valle de Aburrá - Colombia, entre 1920-1999," *Ingeniería y ciencia*, vol. 1, no. 1, pp. 45-65, 2005.
- [3] G. Barreto, and D. Ruiz, *Estudio de la amenaza por avenidas torrenciales en el sector noroccidental de la ciudad de Ibagué (departamento de Tolima)*, Ibagué, 2001.
- [4] I. Piedrahíta, and M. Hermelín, «La avenida torrencial del río Tapartó (Antioquia) 1993,» *Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004*, M. Hermelín, ed., pp. 109-120, Medellín: Universidad Eafit, 2005.
- [5] M. Hermelín, O. Mejía, and E. Velásquez, «El evento torrencial de septiembre de 1990 en San Carlos (Colombia) y sus consecuencias catastróficas,» *Desastres naturales en América Latina*, J. Lugo and M. Inbar, eds., pp. 335-348, México: Fondo de Cultura Económica, 2002.
- [6] H. Flores, R. García, K. Bukor et al., *Estudio geomorfológico del evento de aludes torrenciales de 1999 en la cuenca experimental de San José de Galipán*, Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2004.
- [7] J. Suárez, *Control de Erosión en Zonas Tropicales*, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2001.
- [8] M. Mironova, and V. Yablonsky, «A mathematical model of shear debris flow,» *Erosion, debris flows and environment in mountain regions (Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992)*: IAHS, 1992.
- [9] USGS, *Geological Survey Water-Supply Paper 2275*, 1984.
- [10] L. F. Castillo Navarro, "Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú," Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2006.
- [11] C. OSSO. «Escudriñando en los desastres a todas las escalas,» agosto, 2008; <http://www.osso.org.co/docu/publicac/1999/escudrinando/definiciones.pdf>.
- [12] AMVA, and CTA, «Plan de Ordenación y Manejo de la microcuenca de la quebrada Doña María, municipio de Itagüí. (en proceso de edición),» 2008.
- [13] AMVA, and UNAL, *Estudio para la reglamentación del aprovechamiento, uso y administración de las aguas de la quebrada Doña María, incluidas todas las subcuencas o microcuencas de sus quebradas afluentes, hasta su desembocadura en el río aburra, localizada entre los Municipios de la Estrella, Itagüí y Medellín.*, 2007.
- [14] MIRIO, CORANTIOQUIA, and UNAL, «Metodología para la formulación de planes de ordenación y manejo de microcuencas (PIOM),» 2002, p. 430.
- [15] C. Ordóñez, and R. Martínez, *Sistemas de Información Geográfica, Aplicaciones prácticas con IDRISI KILI*

- MANJARO *al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales*, Madrid: RA-MA, 2003.
- [16] A. Iroume, "Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile," *Bosque (Valdivia)*, vol. 24, no. 1, pp. 125-135, 2003.
- [17] D. Vandine, *Debris flow control structures for forest Engineering*: Ministry of Forest, British Columbia, 1996.
- [18] J. López, R. Garcia, M. Bello *et al.*, "Analysis and Mapping of Debris Flow in Alluvial Fans (Part I: Methodology Description)." in XX Congreso latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, 2002.