

## METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR FLUJO TORRENCIAL DETONADO POR LLUVIA, EN LA MICROCUENCA EL ROLLO MUNICIPIO DE SAN BERNARDO, NARIÑO.

### Methodology for mudflow hazard assessment triggered by rainfall, in El Rollo Watershed, San Bernardo, Nariño.

Álvaro Camilo Cordoba Pazos<sup>1</sup>, Francisco Ricardo Maffla Chamorro<sup>2</sup>  
<sup>1-2</sup>Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia,  
Email: <sup>1</sup>alvacordoba@umariana.edu.co, <sup>2</sup>fmaffla@umariana.edu.co.

(Recibido octubre 19 de 2021 y aceptado diciembre 03 de 2021)

#### Resumen

Los flujos torrenciales son procesos destructivos que se dan a lo largo de todo el mundo, estos se generan en las zonas montañosas y se depositan en abanicos o llanuras aluviales ocupadas por asentamientos humanos transportando gran cantidad de volumen de sedimentos, este es el caso de la microcuenca de la quebrada El Rollo, su red hídrica atraviesa el casco urbano de la vereda San Bernardo, por lo que esta posee una potencialidad para la generación de este tipo de eventos. En el presente trabajo se realizó una metodología para la evaluación de amenaza por flujo de lodos detonados por lluvia empleando sistemas de información geográfica. Para evaluar las características hídricas de la zona se realizó una transformación lluvia caudal, por su parte la amenaza en zona de la cuenca se evalúa a través de la modelación de un evento torrencial para diferentes escenarios planteados, para esto se emplea el modelo matemático FLO-2D, que determina para cada escenario las profundidades y velocidades máximas del flujo sobre las potenciales zonas de deposición. Con los resultados de la simulación, se realiza el mapa de amenaza en función de la intensidad del evento y la frecuencia de ocurrencia.

**Palabras clave:** flujo de lodos, amenaza, caudal líquido, volumen de sedimentos, sistemas de información geográfica.

#### Abstract

Torrential rainfalls are considered destructive processes that take place around the world, these are generated in mountainous areas and are deposited in alluvial fans or plains commonly occupied by human settlements, hence transporting a large volume of sediment, this case particularly applies for "El Rollo" creek micro-basin, its water network flows throughout the urban area of "San Bernardo" village, therefore, it shows a potential for the occurrence of this kind of event. In this work, a methodology was conducted by the implementation of Geographic Information Systems was carried out for the evaluation of the threat due to the flow of sludge formed under rain events. The implementation of a mathematical FLO-2D model allowed a rainfall to flow transition used to determinate the hydric characteristics on the area, subsequently, the threat level in the basin is evaluated through the modeling of a torrential event proposed for different scenarios, establishing depths and peak flow speed rates for each setting over potential deposition zones. Once the simulation results were obtained a hazard map was developed based on the event intensity and its frequency of occurrence.

**Keywords:** sludge flow, threat, liquid flow, sediment volume, geographic information systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, a raíz de la variabilidad climática causada por factores naturales y antrópicos, la recurrencia de eventos asociados a fenómenos amenazantes sumada a las características biofísicas del territorio ha dejado como resultado pérdidas humanas, ambientales, económicas y culturales considerables. En este contexto, las autoridades locales, regionales y nacionales visibilizaron mejorar las políticas públicas para ajustar los parámetros de la planificación territorial a la realidad y contexto de las regiones.

Por esta razón, surgió la creación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) a través de la Ley 1523 del 2012, que permitió a las autoridades gubernamentales aunar esfuerzos técnicos y financieros para mejorar las capacidades de gestión del riesgo por medio de áreas especializadas que se desarrollan bajo tres líneas base conocidas como: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres. De este modo, el fortalecimiento institucional en el área de la Gestión del Riesgo comienza con la autoridad rectora, la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), seguida de las Direcciones Administrativas de Gestión del Riesgo Departamentales (DAGR) y los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD), que les permiten mejorar las capacidades de riesgo desde el nivel local.

Bajo el contexto departamental, Nariño ha presentado acontecimientos socio-naturales recurrentes que han resultado catastróficos, según los datos del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) sucesos como: inundaciones, movimientos en masa, avenidas torrenciales, actividades volcánicas, tsunamis, cambios bruscos de temperatura, incendios de cobertura vegetal, entre otros. Además, se han presentado históricamente, con lo cual se ha identificado que la población nariñense es altamente vulnerable a eventos catastróficos, puesto que muchos de sus centros poblados están asentados sobre abanicos de características aluviales, como lo ha identificado el POMCA del río Juanambú.

En consecuencia, se refleja la necesidad de fortalecer desde la academia por medio de investigaciones y estudios técnicos, el comportamiento de fenómenos escasamente estudiados, como son las avenidas torrenciales. Por esta razón, esta investigación está orientada a conocer el comportamiento de una posible avenida torrencial en una microcuenca que posee las características edafoclimáticas para que, fácilmente, se detone un evento torrencial y que, en consecuencia, puede afectar directamente a un centro poblado.

Es importante entender que “las avenidas torrenciales son una de las amenazas de origen hidrometeorológico de mayor capacidad destructiva en términos de vidas humanas y pérdidas económicas, especialmente en ambientes montañosos y tropicales como Colombia” [1]. Dadas estas características, la avenida torrencial se caracteriza por ser altamente peligrosa y destructiva en las zonas donde se depositan los flujos que corren aguas abajo, usualmente por el canal natural del cuerpo de agua.

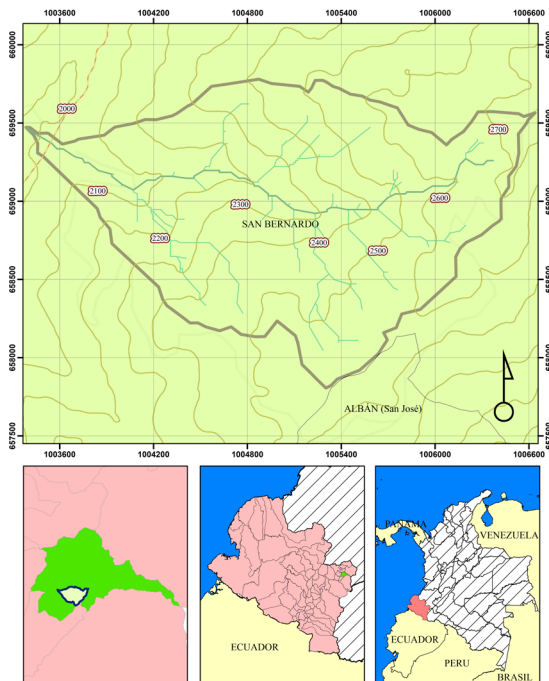
Finalmente, esta investigación representa un asidero importante y fundamental porque contribuye a la gestión del conocimiento del riesgo regional. Asimismo, es importante resaltar que estos estudios son un punto de partida para que las autoridades locales, regionales y nacionales puedan tomar decisiones trascendentales en el marco del ordenamiento territorial. Cabe resaltar que esta información es una aproximación a la realidad y que se puede mejorar con instrumentos especializados.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La microcuenca El Rollo, perteneciente al municipio de San Bernardo en el departamento de Nariño, Colombia cuenta con una extensión de 364,26 hectáreas y abastece de agua al centro urbano principal de dicho municipio. Esta se encuentra ubicada en latitud 1° 30' 52,25" Norte y longitud 77° 02' 35,40" Oeste, a una altitud de 2028 msnm. La microcuenca El Rollo es la principal abastecedora de agua para el acueducto del casco urbano de San Bernardo, se encuentra ubicado al oriente del municipio, ocupa una

superficie de 3.5 km donde se encuentra las veredas de La Florida y Los Alpes del municipio de San Bernardo y los barrios de Guadalupe, San Roque [2].

El Rollo localizada dentro de la Microcuenca del río Quiña tiene su nacimiento en la vereda La Florida, municipio de San Bernardo. Además, su cauce principal sirve de límite Inter-Veredal entre la Florida y Bello Horizonte. Esta Micro cuenca es la principal fuente abastecedora de agua para el acueducto municipal de San Bernardo, tiene un área de 3.5 km<sup>2</sup>, se ubica entre los 2.000 y 2.600 msnm, presenta un clima frio – húmedo, y predominan pendientes inferiores al 20%. Los suelos pertenecen a la clase Agrológica VII, siendo superficiales de muy poco espesor, bastante pedregosos y alcalinidad muy elevada. Estos suelos se han desarrollado a partir de materiales heterogéneos y cenizas volcánicas [3].



**Figura 1.** Ubicación de la microcuenca El Rollo.

Para dar cumplimiento al objetivo número 1 se identificó la ubicación espacial del municipio de San Bernardo, posteriormente, se hizo uso de datos abiertos como son un modelo de elevación digital con una resolución

espacial de 12.5 metros por pixel extraído de un satélite ALOS PALSAR, y usando el software cartográfico especializado ArcGIS, en su extensión ArcMAP, se realizó la digitalización y delimitación de la cuenca, tras esto se procedió a hacer la caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada El Rollo, siguiendo la metodología de [4], alternando con bibliografía adicional para aquellos parámetros que no tenía la metodología en el libro antes mencionado.

En seguida, se solicitó información al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de las estación meteorológica de San Bernardo, adquiriendo una serie de datos de precipitación diaria, a estos se les realizó un arreglo con el cual se cubrió los vacíos de información que presentaban; además, se calculó las curvas IDF, para determinar los hidrogramas en diferentes periodos de retorno para esto se usó la metodología de bloque alterno, con este insumo y a través de la metodología de hidrograma unitario SCS, se calculó los caudales máximos de la cuenca para diferentes periodos de retorno.

Para llevar a cabo la modelación del flujo torrencial, se realizó una calibración del modelo, para esto se hizo una revisión bibliográfica de eventos históricos, a fin de determinar un evento guía, una vez identificado, se procedió a realizar trabajo de campo a fin de determinar mediante información primaria el efecto que este evento tuvo el día que se produjo; en esta etapa, se obtuvo información del tirante o altura que la lámina de agua alcanzó en una zona específica durante el evento guía, tras esto se solicitó al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el pluviograma correspondiente al día del evento que se analizó, con los datos que este muestra.

Con los anteriores datos, se realizó una estimación del caudal que dicho evento tuvo, para esto se introdujeron en el software HEC HMS, los datos de lluvia y las horas en las que esta se produjo, con lo cual se obtuvo el hidrograma del evento que se realizó dicho evento, también se determinaron los coeficientes de rugosidad o

n de *Manning* de la cuenca, para esto se usó el mapa de cobertura elaborado en fases previas.

A continuación, se realizó un análisis de imágenes tanto del cauce como de los sedimentos que este posee, así como de los aportantes de sedimentos que se tienen, con lo cual se determinó un coeficiente volumétrico o CV, con el que se diagnosticó el volumen de sedimentos que se dio en dicho evento.

Con estos insumos se procedió a realizar las corridas correspondientes a la calibración en el software FLO2D, para esto se realizó una transformación del modelo de elevación digital Alos *palsar* con resolución 12.5m, que se obtuvo para el área de estudio de formato *raster* a formato vector tipo punto y se proyectó al sistema de coordenadas correspondientes a la zona. En el software FLO2D se creó un nuevo proyecto desde un formato *shapefile* donde se cargaron los puntos correspondientes al modelo de elevación digital, tras esto se creó una rejilla con la misma resolución que se tiene para la topografía tipo punto, después se importó el *shapefile* correspondiente al límite de la microcuenca con la cual se logró delimitar el área de la modelación, con esto, se interpolaron los valores de la topografía con la rejilla que está dentro de la zona a modelar.

Además, se importó el *shapefile* correspondiente a los coeficientes de *Manning* y se computaron estos en la zona de estudio, se importó el *shapefile* de la red hídrica con la que se identificó el punto inicial para la modelación, se introdujeron como condiciones de entrada en este punto los valores del hidrograma del evento de calibración, es decir, el hidrograma del evento, luego se determinó las aguas abajo el lugar de salida del flujo, reflejadas en el límite inferior de la red hídrica.

Tomando en cuenta la clasificación de flujo que se obtuvo mediante la determinación de coeficiente volumétrico o CV donde se dispuso un flujo del tipo avalancha de lodos, también se seleccionó el tipo de flujo a modelar en el software FLO2D, el cual permitió determinar el valor correspondiente a la gravedad específica, y se realizó un

análisis a partir del mapa de coberturas y la granulometría de la zona para calcular el valor de resistencia del flujo laminar.

A partir de lo anterior, se tomaron los valores propuestos por [5] para la reología, realizando una corrida del modelo para cada serie de datos propuesta en este estudio. Además, se introdujeron los valores del CV identificados, estos fueron introducidos de forma similar al hidrograma teniendo su pico en el punto donde éste presentaba los caudales más altos, con esto se corrió el modelo de calibración. Así también, se realizó una comparación de los resultados obtenidos en dichas modelaciones, frente a los resultados encontrados en el levantamiento de información primaria correspondiente a ese evento en particular; una vez obtenidos todos los parámetros y calibrado el modelo, se realizaron corridas con los hidrogramas calculados para cada periodo de retorno.

Igualmente, se zonificó la amenaza por avenidas torrenciales, a partir de la modelación, teniendo en cuenta dos criterios que son la altura del flujo y la velocidad de desplazamiento del mismo, para esto se siguió la categorización planteada en [6], gracias al software Mapper pro se introdujeron los rangos de categorización y los periodos de retorno correspondientes, con lo que se zonificó la amenaza para los diferentes escenarios propuestos y, finalmente, se determinó la zonificación de la amenaza para la quebrada El Rollo.

#### *Sistemas de Información Geográfica*

Un SIG es un sistema digital para el análisis y manipulación de todo tipo de datos geográficos, a fin de aportar material útil para las decisiones territoriales [7]. Concebidos como “un sistema computarizado capaz de almacenar y utilizar datos que describen lugares de la superficie de la tierra” [8]. Por lo cual su uso es eficiente al momento de crear eventualidades sobre un lugar determinado.

Además, los SIG permiten determinar las condiciones geográficas de las cuencas y convertirlas en objetos con propiedades geométricas y atributos. Cuando las variables hidrológicas son transformadas en capas de

información georreferenciada, las funciones de análisis espacial posibilitan la ejecución operaciones de álgebra de mapas para obtener datos como las pendientes topográficas, dirección del flujo, áreas de drenaje, subcuencas, entre otros [9].

#### *Flujo Hiperconcentrado*

Los flujos hiperconcentrados se consideran intermedios entre los flujos de escombros no-cohesivos y las corrientes fluviales, los flujos de escombros no-cohesivos, pueden transformarse en flujos hiperconcentrados por dilución con agua o viceversa, estos pueden evolucionar a flujos de escombros por un incremento en la concentración de sedimento. Generalmente, presentan concentraciones bajas de sedimento, por lo que su reología es mucho más parecida a las corrientes fluviales [10].

#### *Avenidas Torrenciales*

Son un tipo de movimiento en masa el cual se desplaza por los cauces naturales y transporta grandes volúmenes de sedimentos o materiales de arrastre a altas velocidades, representando un peligro tanto para los habitantes como para la infraestructura que se encuentra ubicada en las zonas aledañas al punto de desemboque.

#### *Factores condicionantes*

Uno de los parámetros importantes para el estudio de la amenaza por flujos concentrados es el conocimiento de las características morfométricas, estas son el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, relieve y drenaje; que permite conocer las características físicas de una cuenca, relevante para la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo [11].

Dichas condiciones morfométricas, geomorfológicas y climáticas permiten realizar evaluaciones de amenaza adecuadas a las condiciones particulares de los lugares de interés para que, con los pertinentes estudios, se pueda realizar una modelación ambiental, con el fin de simular el comportamiento de dichos fenómenos complejos.

#### *Morfometría*

Los flujos son condicionados por la morfología de laderas con alta pendiente (Pendientes mayores a 25° en la parte superior de la cuenca hidrográfica), que las hace potencialmente inestables al favorecer la aceleración de los deslizamientos y contribuir al escurrimiento de agua y reducción de la infiltración [9].

#### *Clima y cobertura de la tierra*

La cobertura vegetal presenta protección al impacto directo de la lluvia, reducción de la energía de las aguas de escorrentía superficial, incremento de la infiltración por acción de las raíces y el aumento de la capacidad de retención de agua [9].

#### *Curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF)*

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno [12]. Por otro lado, la intensidad, se define como la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr) [13].

En consecuencia, las determinaciones de intensidades de precipitaciones se deben hacer a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos [14]. Así también, existe dos principales formas de trabajar con las curvas. La primera, utiliza un análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función Gumbel. La segunda, expresa las curvas IDF como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica [13].

#### *Caudal Máximo*

El caudal máximo de creciente, es un valor que permite asociar la cantidad de agua que fluye en un tiempo determinado, proveniente de una cuenca hidrográfica en particular, estos se asocian a eventos de lluvia, escenarios donde los aportes hídricos son más altos sobre los cuerpos de agua.

El cálculo de caudales se realiza a través de datos históricos de precipitaciones de poca duración representativos de la cuenca y de las características geométricas de la misma: suelos, vegetación, etc. Los caudales se pueden calcular por los métodos: Racional o por el Método del hidrograma sintético SCS [9].

#### Método racional

Este caudal máximo se calcula mediante la Ecuación 1.

$$Q = 0,278 CIA \quad (1)$$

Donde

Q: Descarga máxima de diseño (m<sup>3</sup>/s)

C: Coeficiente de escorrentía

I: Intensidad de precipitación máxima horaria (mm/h)

A: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>).

Sin embargo, “No es recomendable utilizar el método racional porque este método presenta una información parcial del escurrimiento en el punto de descarga de la cuenca” [15].

#### Hidrograma unitario del United States Soil Conservation Service, SCS

Es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos que determina un umbral de escorrentía (Po) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. El Número de Curva toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad. El caudal pico esta dado por la Ecuación 2.

$$Q_p = 0.208 * A / t_p \quad (2)$$

Donde:

Q<sub>p</sub>: Caudal pico del hidrograma unitario para 1 mm de precipitación efectiva, en metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s).

A: Área de drenaje de la hoya hidrográfica, en kilómetros

cuadrados (km<sup>2</sup>).

t<sub>p</sub>: Tiempo al pico, en horas (h).

En el método del SCS, la relación del tiempo al pico t<sub>p</sub> y el tiempo de desfase de la cuenca es:

t<sub>p</sub>/t<sub>l</sub> = 9/10, donde t<sub>l</sub> está dado por la Ecuación 3.

$$t_l = \frac{L^{0.8} (2540 - 22.86CN)^{0.7}}{14104 CN^{0.7} S^{0.5}} \quad (3)$$

Dónde: CN es el número de curva.

S es la pendiente del cauce principal.

L longitud del cauce principal.

Concentración volumétrica

La concentración volumétrica de sedimentos o CV, es la relación existente entre el volumen de sólidos y el volumen total, [5] se expresa mediante la Ecuación 4.

$$CV = \frac{\text{Volumen de sólidos}}{(\text{Volumen de sólidos} + \text{volumen de líquidos})} \quad (4)$$

#### Modelo FLO 2D

El modelo FLO-2D aplica las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en dos dimensiones, este canaliza los flujos al predecir el movimiento del fluido viscoso en función de la concentración de sedimentos. Se hace uso de un modelo reológico cuadrático para predecir tensiones viscosas y de rendimiento en función de la concentración de sedimentos.

A medida que cambia la concentración de sedimentos para un elemento de grilla determinado, se simulan los efectos de dilución, el cese del flujo y la removilización de depósitos. El esfuerzo de corte total en flujos de sedimentos hiperconcentrados, incluyendo flujos de lodos o detritos, puede ser calculado como la suma de cinco componentes del esfuerzo de corte como se muestra en la Ecuación 5.

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (5)$$

Donde T<sub>c</sub> es el esfuerzo de fluencia, T<sub>mc</sub> Esfuerzo de corte Mohr – Coulomb, T<sub>v</sub> el esfuerzo cortante viscoso, T<sub>t</sub> el esfuerzo cortante turbulento y T<sub>d</sub> el esfuerzo cortante dispersivo.

La ecuación anterior puede ser expresada en términos de tasas de deformación ( $dv/dy$ ), con el modelo reológico cuadrático desarrollado en [5] como se muestra en la Ecuación 6.

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{dv}{dy} \right) + c \left( \frac{dv}{dx} \right)^2 \quad (6)$$

Donde  $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$ ,  $\eta$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $dv/dy$  es el Gradiente de velocidad y  $C$  el coeficiente de esfuerzo cortante inercial, calculado en función de la concentración del fluido.

Así pues, en San Bernardo la ocurrencia de este tipo de fenómenos traería efectos adversos, primordialmente, sobre la economía, la población y su infraestructura, debido a que uno de los principales inconvenientes para delimitar la amenaza por este tipo de eventos consiste en la dificultad de predecir su ocurrencia, ya que existen diferentes causas que dan origen a una avenida torrencial, como una alta precipitación que genere una serie de deslizamientos, o un deslizamiento de gran magnitud que origine represamiento en el cauce de la red hídrica generando un estancamiento de esta, la ocurrencia de sismos que produzcan deslizamientos, o la ocurrencia de erupciones volcánicas.

Por lo anterior, se evidencia que, por las condiciones geográficas, climáticas y de ocupación en el municipio de San Bernardo, existe un elevado potencial de avenidas torrenciales que pueden afectar a la población y a la infraestructura asentadas en el lugar ya que hay zonas habitadas en la parte media y baja de la cuenca que podrían presentar una amenaza considerable frente a este tipo de fenómenos.

#### *Amenaza*

Se define según la Ley 1523 de 2012, como un peligro latente de que un suceso físico de origen natural o causado por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos como pérdidas en los bienes, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

El nivel de amenaza por inundación o flujo torrencial, en un lugar específico, es una función tanto de la intensidad del evento como de la probabilidad. La intensidad del evento se define por la profundidad de flujo y velocidad. La probabilidad está inversamente relacionada con la magnitud de inundación. En este sentido, las grandes inundaciones ocurren con menos frecuencia; entonces, el nivel de amenaza por flujo de detritos se define como una función combinada discreta de la intensidad del evento (severidad del evento) y el período (frecuencia) [5].

### 3. RESULTADOS

Con la serie de datos de la estación pluviométrica San Bernardo con código de estación [52045030], se evaluó la cantidad de días que presentaron lluvia por cada año a fin de determinar el comportamiento histórico de los datos, con lo que se comprobó que la zona posee un alto régimen de precipitación, siendo estas constantes durante el año, en promedio, según la serie de datos evaluada se tiene una cantidad de 206 días de lluvia por año.

Además, la precipitación tiene un comportamiento relativamente similar, por lo que se realizó un análisis de datos faltantes en la serie, a través del método de regresión múltiple, que permitió llenar dichos datos.

Mediante la función de Gumbel la cual usa el método de los momentos [4]. Se determinaron las precipitaciones máximas diarias probables para distintas frecuencias tomando periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, así como, distintas duraciones de lluvia en horas, para lo cual se hizo uso de coeficientes a fin de determinar relaciones para una lluvia de duración de 24 horas [16].

La intensidad de lluvia es la cantidad total de agua caída por unidad de tiempo y se mide en mm/hora [17], por lo que se relaciona directamente estas dos variables, así, mediante regresiones potenciales ya que se evidencia, claramente, que la intensidad es directamente proporcional a los periodos de retorno, y que entre mayores sean estos, más altas son las intensidades de lluvia; de igual manera, estas son inversamente

proporcionales al tiempo de duración del evento, ya que entre menor es dicha duración, más alta es la intensidad; es así que, estos valores de intensidad de precipitación, se ubican en periodos de retorno alto con tiempos de duración de lluvia bajos.

Se obtuvo el valor de los coeficientes  $d$  y  $n$  para cada periodo de retorno, y se determinó el promedio de estos, siendo este coeficiente el medio que alimentó la ecuación general que modela la intensidad según su duración para los diferentes periodos de retorno.

Se realizaron las curvas IDF de la microcuenca El Rollo que se muestra en la Figura 4, para los periodos de retorno seleccionados anteriormente que corresponden a la frecuencia.

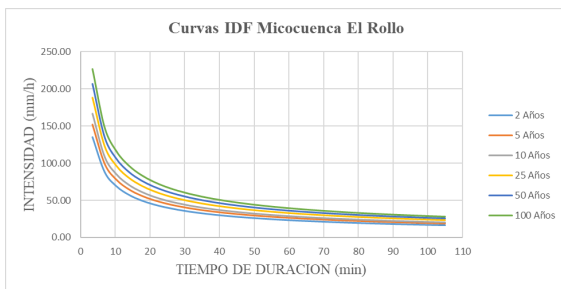


Figura 2. Curvas IDF, microcuenca El Rollo.

Los hietogramas obtenidos mediante la metodología de bloque alterno, y el mapa de coberturas gracias a la metodología *corine land cover* adaptada para Colombia, permitieron determinar las propiedades del suelo y haciendo uso de la metodología de hidrograma unitario SCS, se realizó el cálculo de los caudales máximos de la cuenca según su periodo de retorno, así pues, se obtuvieron los resultados que se ilustran en la Figura 7, donde se presentan los hidrogramas para cada periodo de retorno y se aprecia el caudal máximo que estos poseen. De la misma manera, se puede observar que entre mayor sea el periodo de retorno más alto será el valor máximo de dicho caudal.

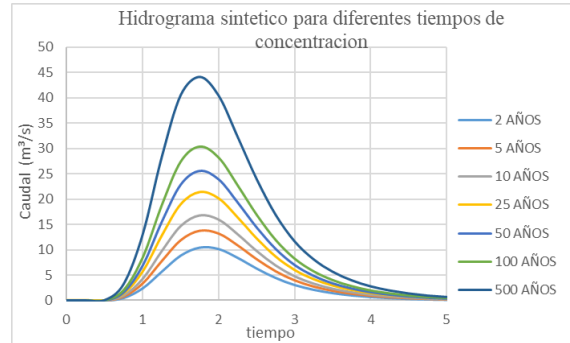


Figura 3. Caudales para diferentes periodos de retorno en la microcuenca El Rollo.

Paralelamente, se realizó el cálculo del caudal máximo por medio del método racional a fin de realizar una comparativa entre diversos métodos de estimación de caudal, esto con el fin de validar los resultados y optar por la valoración más acorde a las características del área de estudio. Resultados ilustrados en la tabla 1, en esta, se puede denotar la eficiencia de los métodos sintéticos para la estimación de caudales máximos, esto se debe a que en este tipo de metodologías se encuentran variables que en otras no, tales como abstracciones o escorrentía del sistema, de aquí, que otros métodos tiendan a sobreestimar los valores de caudales máximos, como es el caso del método racional, el cual, no tiene en cuenta las variables antes mencionadas.

Tabla 1. Comparativa de valores de caudal máximo calculado por diferentes metodologías

Periodo de retorno	Método racional m³/s	Método SCS m³/s
2	25.53	10.44
5	28.83	13.76
10	31.60	16.76
25	35.68	21.45
50	39.11	25.62
100	42.88	30.38
500	53.07	44.05

#### Modelamiento de flujo torrencial

Con el estudio hidrológico definido, se procedió a determinar aquellas variables que el modelo FLO 2D



requiere para la simulación de eventos torrenciales, para llevar esto a cabo se calcularon una serie de parámetros y se calibró el modelo haciendo uso de un evento real, con el fin de que la modelación sea lo más aproximada posible a una eventualidad real.

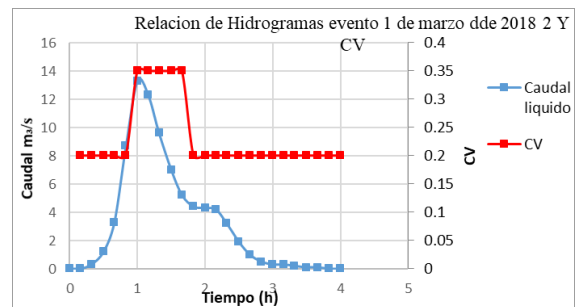
De igual modo, se analizó una serie de imágenes de la microcuenca El Rollo tomadas en las visitas de reconocimiento que se hicieron en la fase inicial de la investigación las cuales se muestran en la Figura 1. En esta se identificaron sedimentos de tipo canto rodado. A continuación, se tomó una muestra en el lecho de la microcuenca a partir de la cual se obtuvo la curva granulométrica, la cual denota el tamaño de partículas predominante en el lecho. En este caso, para el lecho de la microcuenca El Rollo predominan piedras pequeñas que proceden de la fragmentación o grava, esto debido a que el tamaño de las partículas que forman el suelo es superior a 2 mm [18].



**Figura 4.** Sedimentos presentes en la microcuenca El Rollo

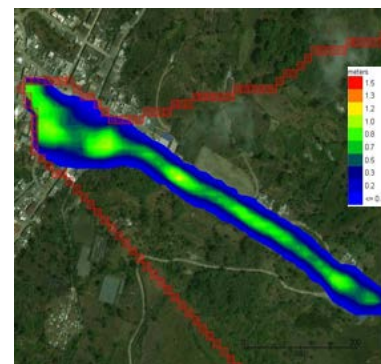
De tal manera que, se pueda calibrar el modelo, se analizó la lluvia correspondiente al día 01 de marzo de 2018; por esta razón, se solicitó el pluviograma acorde con la medición de la precipitación de este día, con lo que se hizo uso del software HEC HMS, en el cual se introdujeron los valores de lluvia correspondientes. En seguida, se realizó la transformación lluvia – caudal determinando así el hidrograma producido; los resultados obtenidos se observan en la Figura 4, en donde se aprecia la relación entre el caudal líquido con el coeficiente volumétrico, el cual está directamente relacionado con el volumen

de sólido que el flujo es capaz de transportar. Dicho coeficiente fue determinado en fases previas, acorde con lo establecido por diversos autores; de esta manera, no fue tomado como un valor constante, sino que, se varió este en función del caudal líquido, debido a que los caudales bajos no son capaces de transportar ni erosionar grandes cantidades de sedimentos, mientras que, a medida que estos crecen, la capacidad de transporte aumenta proporcionalmente.



**Figura 5.** Caudal líquido obtenido mediante el software HEC – HMS y CV correspondiente al evento del día 1 de marzo de 2018.

Con estos parámetros se realizó la corrida en el modelo FLO 2D alternando valores hasta conseguir una aproximación en cuanto a las alturas registradas en el evento guía.



**Figura 6.** Modelación en el software FLO 2D del evento registrado el día 1 de marzo de 2018.

En seguida, se usó el software Mapper pro, con el cual se determinó la amenaza para diferentes periodos de retorno como se muestra en las Figuras 7, 8 y 9, se puede observar que los resultados muestran que para periodos

de retorno bajos como es el caso de 2 años, la amenaza no es especialmente representativa, ya que las zonas correspondientes a una amenaza alta coinciden con el cauce natural de la quebrada y, las zonas con amenaza baja, corresponden a las márgenes de la fuente hídrica; así también, se encontró que para el periodo de retorno correspondiente a 10 años, hay una amenaza alta que abarca un área, la cual se concentra en el casco urbano. En consecuencia, la amenaza para eventos de este tipo tiene una mayor incidencia, igualmente en las zonas con amenaza media y baja, que abarcan un área mayor y, para el caso de la amenaza, corresponde a un periodo de retorno de 50 años.

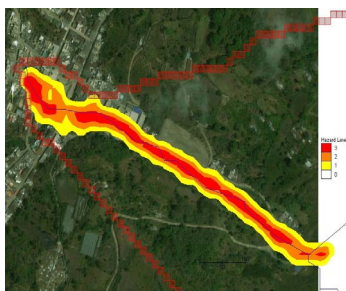


Figura 7. Amenaza para periodo de retorno 2 años

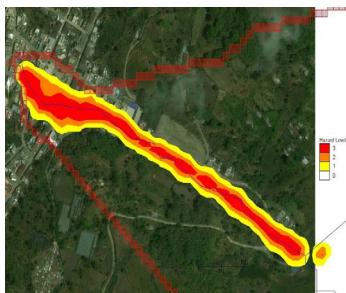


Figura 8. Amenaza para periodo de retorno 25 años

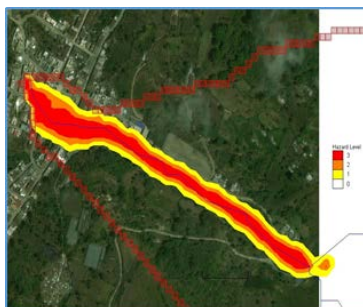


Figura 9. Amenaza para periodo de retorno 50 años

Tabla 3. Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en la quebrada El Rollo

Amenaza Potencial	Color	Descripción
Alta.	Rojo	Las personas están en peligro tanto dentro como fuera de sus viviendas. Las estructuras están en peligro de ser destruidas.
Media.	Naranja	Las personas están en peligro fuera de sus casas. Las edificaciones pueden sufrir daños y posible destrucción dependiendo de las características de construcción.
Baja.	Amarillo	El peligro sobre las personas es bajo o inexistente. Las edificaciones pueden sufrir daños leves, pero la inundación o sedimentación puede afectar el interior de las estructuras.

Así pues, se encontró que la amenaza alta abarca gran parte del centro poblado San Bernardo, por lo cual, siguiendo lo expuesto en [5], ilustrado en la Tabla 3, se presenta una amenaza real seria y alta para los pobladores del centro urbano, tanto en espacios abiertos como en recintos cerrados, ya que en esta zona las afectaciones se darían no solo en los habitantes sino también en las edificaciones; de igual manera, la amenaza media se encontró principalmente en las márgenes del canal natural, expandiéndose en el centro poblado, en esta zona los destrozos potenciales en edificaciones es inferior, por lo que las personas amenazadas son aquellas que se encuentren al aire libre, mientras que la amenaza baja, se encuentra esencialmente en la zona aguas debajo de la quebrada. Los resultados hallados son de especial interés, debido a que se constata que el centro poblado San Bernardo se encuentra amenazado frente a un eventual fenómeno de tipo torrencial detonado por lluvia.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados indicados se obtuvieron a través del uso de herramientas SIG y un modelo especializado en diversos tipos de flujo que se desarrolla con información topográfica e hidrológica, con lo cual se concluye que este tipo de modelos se constituye como una aproximación a esta clase de fenómenos, ya que estudian el mismo, de forma íntegra, tomando una serie de variables, que permiten caracterizarlo y simularlo de forma aceptable.

En aras de mejorar los resultados obtenidos se realizó un cálculo por el método racional que permitió comprobar que la metodología SCS, que arroja resultados más aproximados a la realidad, con lo cual se comprobó que esta metodología tiene un mayor ajuste al modelo hidrológico de la quebrada El Rollo, mientras que otras metodologías como el método racional tienden a mayorar excesivamente los resultados de caudal máximo.

Se concluye que la ronda hídrica de la quebrada en estudio se encuentra comprometida, dado que la incidencia del fenómeno se desborda sobre las franjas paralelas del canal natural alcanzando su ancho máximo después del desborde, generando un riesgo directo a las zonas urbanas.

De igual manera, se concluye que para llevar a cabo una simulación idónea es necesario una óptima calibración del modelo, ya que este es la base de todas las corridas posteriores, y es bajo esta que se define como se comportará el flujo a modelar.

Asimismo, la investigación identificó los niveles de amenaza (alta, media, baja) del fenómeno estudiado en los diferentes periodos de retorno establecidos. Estos resultados se obtuvieron a través de la incorporación de información antes descrita en el software FLO2D mediante la extensión Mapper indicando claramente las zonas donde la amenaza por avenidas torrenciales tiene mayor y menor incidencia. Con lo anterior, se concluye que el casco urbano del centro poblado San Bernardo, posee una alta amenaza frente a avenidas torrenciales,

y que los habitantes de las zonas aledañas al cauce de la quebrada El Rollo, se encuentran en peligro, así como, sus viviendas, debido a la magnitud de este tipo de eventos.

Finalmente, según los resultados obtenidos mediante información recolectada y debidamente procesada, se puede concluir que el casco urbano del municipio de San Bernardo se encuentra amenazado por una eventual avenida torrencial que se presente en la quebrada El Rollo. Cabe resaltar que, ante los antecedentes presentados en el municipio por las quebradas La Mina y El Pailón, es importante prestarle atención al comportamiento de la quebrada El Rollo, especialmente, en épocas de altas precipitaciones, donde los aportes al caudal pueden llevar a presentar un evento altamente peligroso.

#### REFERENCIAS

- [1] E. Aristizábal, M. I. Arango Carmona & , I. K. García López. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. Cuadernos De Geografía: Revista Colombiana De Geografía, 29(1), 242-258. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
- [2] CORPONARIÑO. (2008). Diagnóstico Biofísico y Socioeconómico Municipio San Bernardo (N). 1–154. Recuperado de: [http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/DIAGNOSTICO\\_BIOFISICO\\_Y\\_SOCIO\\_ECONOMICO\\_SAN\\_BERNARDO.pdf](http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/DIAGNOSTICO_BIOFISICO_Y_SOCIO_ECONOMICO_SAN_BERNARDO.pdf)
- [3] Alcaldía Municipal de San Bernardo (2012). Plan de Desarrollo Municipio de San Bernardo Nariño. Secretaria de Planeación y Desarrollo Municipal.
- [4] G. Monsalve Sáenz. (2004). Hidrología En La Ingeniería (2a. Ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [5] J. O'Brien. (2009). User's Manual FLO-2D. Retrieved from: <https://www.flo2d.com/download/>
- [6] R. García & J. L. López (2005). "Debris Flows of December 1999 in Venezuela." Chapter 20th of Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Jakob, Matthias, Hungr, Oldrich Eds. Springer Verlag Praxis, Berlin.
- [7] J. Santos. (2004) Sistemas de información geográfica.

Unidad didáctica. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2004, 460 p. ISBN 84-362-2006-4 (código UNED: 60105UD01A01)

- [8] G. Meaden & J. Kapetsky. Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. FAO Documento Técnico de Pesca. N° 318. Roma, FAO. 1992. 266p
- [9] A. Sepúlveda & J. Patiño. (2016). Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia. (tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- [10] D. Sarocchi. (2007). Estudio sedimentológico del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de colima. UNAM.
- [11] F. J. Gaspari. (2012). Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG. La Plata Argentina
- [12] J. Témez. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.
- [13] V. T. Chow, D. R. Maidment, L. W. Mays. (1994). Hidrología aplicada. Mc Graw Hill.
- [14] V. Aros. (1997). Apuntes de Hidrología. Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 25- 31 p.
- [15] G. François & H. Pizarro. (2005). Distribución de Agua Potable y Colecta de Desagües y de Agua de Lluvia. Presses inter Polytechnique.
- [16] A. Campos. (1978). " Precipitación en Procesos del Ciclo Hidrológico", 1a ed., San Luis Potosí., México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí
- [17] J. Heuvelop, J. Pardo Tasies, S. Quiros Conejo & L. Espinoza Prieto. (1986). Agroclimatología Tropical. Universidad Estatal a Distancia, San José (Costa Rica).
- [18] J. Sierra, M. Navarro, G. Gómez & J. Muñoz. (2013). Optimización del análisis del tamaño de grano de arenas costeras.