



Boletín Ambiental

Fotografía: deslizamiento sobre el río San Eugenio con afectación al barrio El Triunfo
Fuente: Aldesarrollo (2022)

Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- Sede Manizales

207 | septiembre de
2023

**Determinación de zonas de
amenaza por inundación
Estudio hidráulico del río San Eugenio
Santa Rosa de Cabal, Risaralda**

IDEA

Instituto de Estudios Ambientales

Determinación de zonas de amenaza por inundación Estudio hidráulico del río San Eugenio Santa Rosa de Cabal, Risaralda

Actualizado en septiembre de 2023

Juan Camilo Ramírez Carmona
Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad Antonio Nariño Sede Pereira
jramirez18@uan.edu.co

Fabián Andrés Yara Amaya
Ingeniero Civil
Especialista en Ingeniería Hidráulica y Ambiental
Magíster en Ingeniería- Recursos hidráulicos
Docente de Cátedra Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
fayaraa@unal.edu.co

Freddy Leonardo Franco Idarraga
Ingeniero Civil
Especialista en Sistemas y Computación
Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental
PhD en Medio Ambiente Urbano
flfrancoi@unal.edu.co

RESUMEN

Se presenta un estudio para entender el comportamiento hidráulico del río San Eugenio en Santa Rosa de Cabal (Risaralda), utilizando información hidrológica del Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) para incorporarla al software bidimensional IBER 3.3.1 y de esta forma calcular las áreas inundables con información de niveles de agua y velocidades para periodos de retorno de 100 y 500 años. Los resultados obtenidos permitieron definir las áreas en condición de amenaza por inundación, siendo los sectores más afectados aquellos barrios localizados en la llanura inundable (ocupada con asentamientos humanos o actividades socioeconómicas) donde la altura del agua supera un metro de profundidad. La importancia de un estudio con estas características es que, a través de simulaciones de diferentes escenarios, es posible entender la dinámica de las inundaciones e identificar los sectores de la ciudad susceptibles de ser anegados, siendo un útil insumo para la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) municipal y el plan de emergencias de la ciudad.

Palabras clave: hidráulica fluvial, inundaciones, modelación hidráulica, modelación hidrológica, zonificación amenaza, gestión del riesgo

INTRODUCCIÓN

Para la modelación de las inundaciones del río San Eugenio en Santa Rosa de Cabal se tomaron como referencia los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS) de los ríos Otún y Campoalegre, información hidrológica del IDEAM y la CARDER, además de información secundaria proporcionada por la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, siguiendo las metodologías del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el “Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas” (Minambiente, 2014) y la “Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación” (IDEAM 2017).

Con los anteriores y otros estudios recopilados, la metodología fijada para este estudio hidráulico implicó generar un modelo digital de terreno que representó detalladamente las condiciones geomorfológicas de la zona; modelado topográfico digital al que se aplicaron las rugosidades producto de las coberturas vegetales y tipología de suelos, el cual se “inundó computacionalmente” con datos provenientes de la hidrología empleando el software bidimensional IBER. Proceso que, además, requirió fases de calibración y validación del modelo, consistentes en evaluar la precisión lograda por la cobertura de las manchas de inundación, las profundidades o cotas del agua y las velocidades de esta (Bladé et al., 2014).

No obstante, atendiendo a la dinámica del río San Eugenio en la zona, es necesario continuar profundizando en el conocimiento de su comportamiento, manteniendo actualizada la topografía y, sobre todo, la batimetría, a fin de elaborar cada vez mejores modelos de elevación digital del terreno, con los cuales definir mejor la geometría del cauce y sus márgenes; así como continuar monitoreando caudales y niveles en las estaciones aguas arriba y de la zona, para alertar sobre posibles eventos de crecida y con esta información alimentar nuevos modelos hidrológicos e hidráulicos para diferentes escenarios o eventos hidroclimatológicos extremos.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Santa Rosa de Cabal es un municipio colombiano localizado al suroriente del departamento de Risaralda en las coordenadas 4° 52' de latitud norte y 75° 37' de longitud oeste (ver Figura 1), su cabecera municipal se encuentra a 1840 metros sobre el nivel del mar a una distancia de 15 kilómetros de Pereira; su temperatura media es de 19 °C y la precipitación media anual de 2931 mm (Alcaldía Municipal Santa Rosa, 2022) (Yara & Franco, 2022).

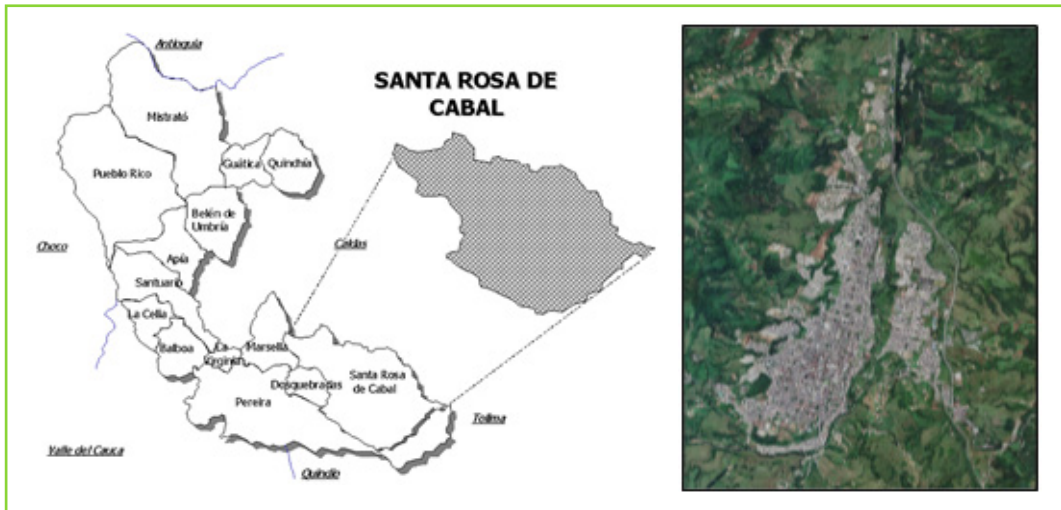


Figura 1. Localización Santa Rosa de Cabal

Fuente: adaptado de Wikipedia org. (2022), Satélite Google Earth (2023)

Considerando que la gran mayoría del territorio municipal se caracteriza por un relieve montañoso de altas pendientes en una geología de cenizas volcánicas y precipitaciones de elevada intensidad y duración, la cuenca media del río San Eugenio es propensa a la ocurrencia de avenidas torrenciales, caudales máximos que llegan a transportar sedimentos de gran tamaño, que combinados a los procesos de agradación y degradación a causa de intervenciones antrópicas y a la exposición de los asentamientos humanos ubicados en el área de influencia del río, configuran un importante riesgo y en el caso de ocurrir un desastre, se dan con grandes afectaciones a la población.

Se resalta el evento de 1987 donde resultaron afectadas 2500 personas y destruidas 500 viviendas (EMPOCABAL S.A E.S.P, 2008) o los últimos sucesos en 2010 y 2011 en los que la Secretaría de Planeación censó 357 familias afectadas (ver Tabla 1 y Figura 2). (Cámara de Comercio de Santa Rosa de Cabal 2011), (Yara & Franco 2022).

Tabla 1. Número de familias afectadas por la ola invernal

Fuente: Cámara de Comercio de Santa Rosa de Cabal (2011) Yara & Franco (2022)

AÑO	# DE FAMILIAS AFECTADAS
2010	159
2011	198
2022	80



Figura 2. Inundaciones causadas por el río San Eugenio

Fuente: El Diario, 2022

Los problemas suceden porque las áreas a lado y lado del cauce se encuentran ocupadas por viviendas formales e informales, comercios, e infraestructura; sumado a que las quebradas afluentes al río se encuentran contaminadas con escombros y basuras que impiden la salida de aguas, por lo que se producen remansos y reflujos de aguas residuales, lluvias y del río hacia el interior de la población, lo que también configura situaciones de riesgo por salud pública. Además, el río San Eugenio, al pasar por el casco urbano, es atravesado por varios puentes que estrechan su sección, acrecentando el problema en caso de circulación de flujos torrenciales (ver Figura 3).

Ha sido el crecimiento poblacional, comercial, turístico y de servicios con el vertimiento de residuos líquidos y sólidos, la deforestación para criar ganado, las plantaciones y construcciones -incluso en las márgenes del río- lo que ha generado cambios en el suelo y disminución de la infiltración, lo que causa mayores escorrentías y desestabilizaciones que incrementan la erosión y la contaminación que en épocas de fuertes lluvias producen crecientes súbitas con pérdida de vidas humanas y de bienes.



Figura 3. Puentes sobre el río San Eugenio a su paso por el casco urbano
Fuente: adaptado de Google Earth 2023

DESCRIPCIÓN DEL MODELO IBER

IBER es un modelo numérico 2D de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen variable, que incorpora como esquema numérico el método de alta resolución de volúmenes finitos (Bladé et al., 2009). Sobre una malla no estructurada resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas -Saint Venant 2D- en dos dimensiones, considerando los efectos de la turbulencia y la fricción superficial con conservación de masa y de momentum (Sanz-Ramos et al., 2016) (Yara & Franco, 2022).

- Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0 \quad [1]$$

Donde h corresponde a la profundidad del agua y U_x, U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad.

- Ecuación de conservación del momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{T_{s,x}}{\rho} - \frac{T_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \quad [2]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) = -gh\frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{T_{s,y}}{\rho} - \frac{T_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \quad [3]$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, p es la densidad del agua, Z_b es la cota de fondo, T_s la fricción de superficie libre con la ecuación de Van Dorn, T_b es la fricción evaluada a través de la ecuación de Manning y V_t la viscosidad turbulenta.

Para este estudio, se empleó el modelo de turbulencia K-ε de Rastogi y Rodi, útil para una amplia gama de flujos (Tipan Casa, 2016).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \epsilon \quad [4]$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\epsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\epsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\epsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho |U|^2} \quad [5]$$

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\epsilon 1} = 1.44 \quad c_{\epsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.31$$

METODOLOGÍA

Para representar el comportamiento del río San Eugenio a su paso por el casco urbano de Santa Rosa de Cabal, se siguieron los siguientes pasos (adaptado de Yara & Franco, 2022):

1. Recolección, procesamiento y análisis de series hidrológicas del IDEAM (caudales, niveles), datos base y estudios hidrológicos desarrollados en el área.

Se utilizó la información hidrológica contenida en los POMCAS de los ríos Otún y Campoalegre (ver Tabla 2). Esta información se encuentra confrontada con el indicador Ocean Niño Index (ONI) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para analizar años “Niño” o de estiaje, promedio o neutros y años “Niña” o invernales, llegando a los siguientes caudales máximos:

Tabla 2. Caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno (años)
 Fuente: elaboración propia según CARDER (2017) y CARDER - CORPOCALDAS (2020)

CORRIENTE	Q_2.33 (m ³ /s)	Q_5 (m ³ /s)	Q_10 (m ³ /s)	Q_20 (m ³ /s)	Q_50 (m ³ /s)	Q_100 (m ³ /s)	Q_500 (m ³ /s)
San Eugenio	70.0	100.8	117.6	141.4	173.6	196.0	249.1

2. Compilación, análisis y procesamiento de levantamientos topográficos para construir el modelo digital de terreno.

Se realizó la compatibilización del modelo digital de terreno de la plataforma Land Viewer (pixel 4.7x4.7m), el modelo digital de la NASA (pixel 12.5x12.5m), cartografía de la CARDER (escala 1:5000) e imágenes georreferenciadas; permitiendo construir un modelo digital a resolución de 5.0x5.0m (ver Figura 4), a fin de visualizar detalladamente las condiciones geomorfológicas del cauce y sus orillas.

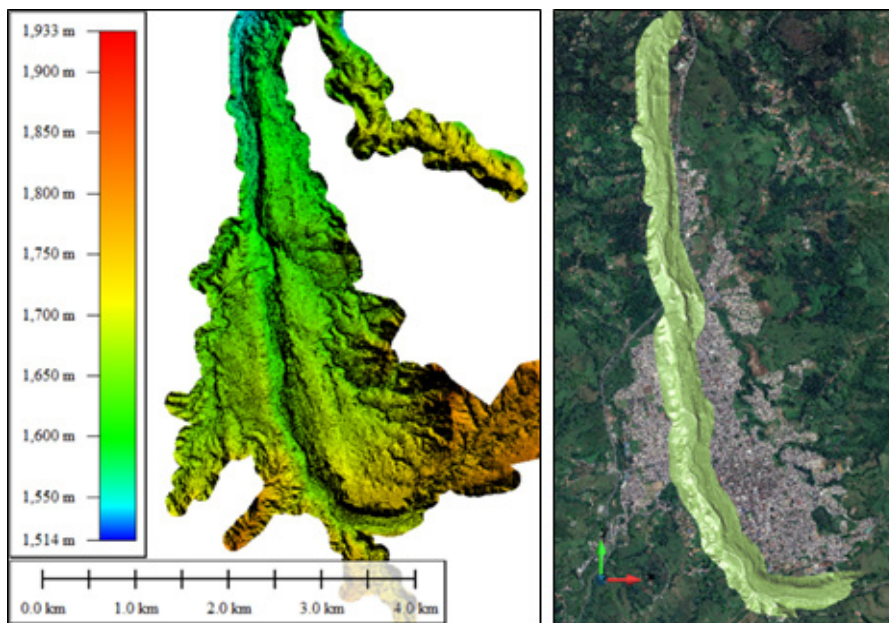


Figura 4. Modelo digital de elevación
 Fuente: elaboración propia

3. Implementación del modelo hidráulico: mallado, condiciones de borde, rugosidades, tiempo de simulación y puesta en marcha.

Se realizó un buffer de 250 m a ambos lados del cauce principal, con el fin de tener una zona amplia sobre la cual generar la mancha de inundación sin obstáculos en el modelo (ver Figura 5), luego se definió la malla de tipo no estructurado con elementos cuadrados y triangulares de 5 m de lado adaptado al DEM. El tamaño se adoptó de acuerdo con la necesidad de representar lo más fielmente el terreno.

Las condiciones de borde son los caudales a diferentes periodos de retorno (ver Tabla 2), considerando condición de flujo permanente (el caudal no varía en el tiempo de simulación), para garantizar la estabilidad del cálculo y cumplir con la condición de *Courant* ($\Delta T \leq 1$) (Sánchez, 2003).

Para especificar las rugosidades de la zona de estudio se emplearon los mapas de uso de suelo de los POMCAS y la base de datos *Corine Land Cover* Colombia y con la metodología de Chow (2004) se estableció el valor de rugosidad (IDEAM et al. 2008) (ver Figura 5). Mediante iteraciones en las simulaciones se estableció un tiempo de cálculo mínimo de 30 000 segundos, llevándose el cálculo a 8 horas.



- vegetación densa
- Bosque_de_galeria_y_ripario
- Bosque_fragmentado
- Cultivo_confinados
- Instalaciones_recreativas
- Mosaico_de_cultivos
- Mosaico_de_cultivos_y_espacios_natur...
- Mosaico_de_pastos_con_espacios_natur...
- Mosaico_de_pastos_y_cultivos
- Pastos_arbolados
- Pastos_enmalezados
- Pastos_limpios
- Plantacion_forestal
- Red_vial
- Riego
- Tejido_urbano_continuo
- Tejido_urbano_discontinuo
- Zonas_arenosas_naturales
- Zonas_de_extraccion_minera
- Zonas_verdes_urbanas
- Mosaico_de_cultivos_pastos_y_espacio...
- Cultivos_permanentes_arbustivos

LEYENDA	N de "mannig"
Bosque de galería y ripario	0.150
Bosque fragmentado	0.100
Cultivos confinados	0.035
Cultivos permanentes arbustivos	0.040
Instalaciones recreativas	0.028
Mosaico de cultivos	0.030
Mosaico de cultivos y espacios naturales	0.030
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.030
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.020
Mosaico de pastos y cultivos	0.020
Pastos arbolados	0.022
Pastos enmalezados	0.022
Pastos limpios	0.022
Plantación forestal	0.050
Red vial	0.028
Ríos	0.030
Tejido urbano continuo	0.028
Tejido urbano discontinuo	0.025
Zonas arenosas naturales	0.035
Zona de extracción minera	0.035
Zonas verdes urbanas	0.028

Figura 5. Mallado y mapa de rugosidad empleado en el software IBER 2D
 Fuente: elaboración propia

4. Calibración y validación del modelo hidráulico

Si bien, no se contó con información oficial que mostrara los alcances de los eventos de inundación ocurridos en el pasado, se efectuaron ajustes a la rugosidad, de manera tal que, el caudal simulado llegase al menos al 90 % con el caudal real, lo que equivale a un error relativo con valor menor o igual del 10 % (IDEAM, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) y la CARDER, definieron que para cuerpos de agua con considerables modificaciones en su morfología o donde la llanura inundable está ocupada con asentamientos humanos o actividades socioeconómicas y no hay posibilidades para el almacenamiento temporal de agua y sedimentos, los retiros por amenaza de inundación (lenta o súbita) se deben definir mediante un evento con al menos 100 años de periodo de retorno.

Sin embargo, autores como Díez Herrera et al., (2006), clasifican la zona inundable como el espacio fluvial determinado por la avenida con un periodo de retorno de 500 años, limitando los usos antrópicos para preservarlos de eventos extraordinarios. Razón por la cual, en el presente trabajo, se presentan las inundaciones para ambos periodos de retorno, incluyendo de paso la recomendación oficial (Yara, 2019).

Los resultados del modelo se centran en la zona sureste del municipio (donde históricamente se han presentado las mayores afectaciones). La Figura 6 expone las manchas de inundación del San Eugenio para periodo de retorno $T_r = 100$ años ($Q = 196.0$ m³/s) con resultados de valores máximos de profundidad de agua que varían entre 8.75 m y 7.01 m, valores medios entre 6.13 m y 3.51 m y mínimos que oscilan entre 1.76 m y 0.01 m.

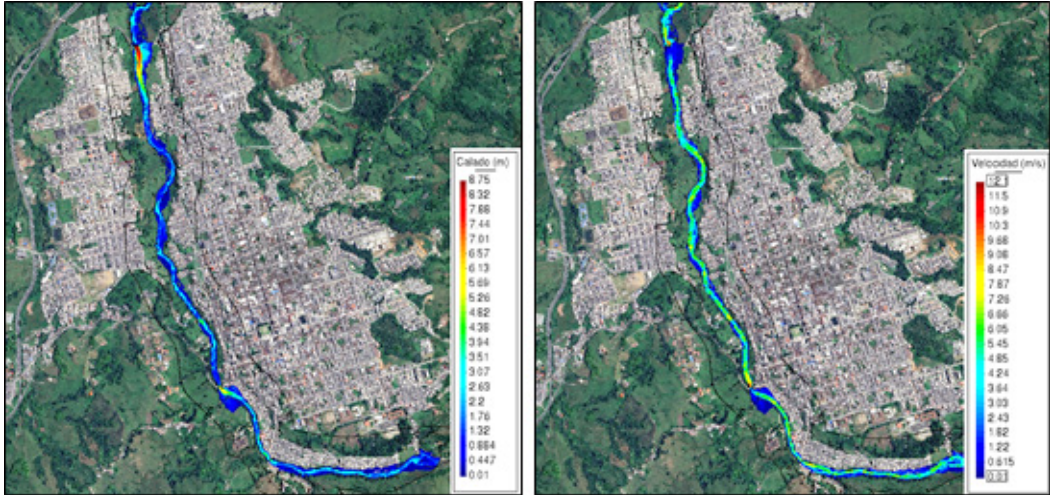


Figura 6. Manchas de inundación con profundidad de lámina y velocidad - periodo de retorno 100 años
Fuente: elaboración propia

Para $Tr = 500$ años ($Q = 249.1 \text{ m}^3/\text{s}$) con un caudal mayor por el más amplio periodo de retorno, obviamente se dan profundidades máximas de lámina de agua un tanto superiores, entre 9.00 m y 7.94 m, valores promedio entre 6.35 m y 4.24 m y mínimos entre 1.6 m y 0.01 m (ver Figura 7).

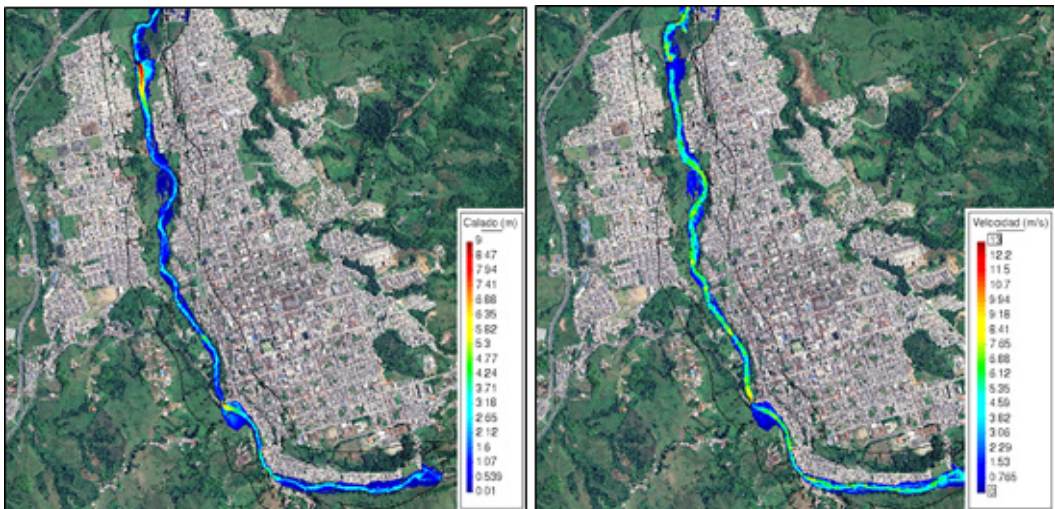


Figura 7. Manchas de inundación con profundidad de lámina y velocidad - periodo de retorno 500 años
Fuente: elaboración propia

En cuanto a velocidades del agua (Figura 6 y Figura 7), pueden alcanzarse valores de 12.00 m/s en zonas muy localizadas del talweg y valores medios entre 6.88 m/s y 6.12 m/s. Valores de velocidad que como es característico en los ríos de montaña con estos flujos “acelerados” o avenidas torrenciales se produce erosión de los taludes de las orillas (Posada, 1994), pero la pendiente prevalece y en consecuencia las altas velocidades no merman e incluso pueden aumentar y/o por la acumulación de sedimentos que hayan quedado de anteriores eventos; se va modificando el discurrir del cauce (Tapia et al., 2012).

Reportado por la Gobernación de Risaralda (2007) para el municipio de Santa Rosa de Cabal, las avenidas torrenciales del río San Eugenio son los eventos más frecuentes, lo que coincide con los reportes de la base de datos de desastres Desinventar (31 eventos de “inundación” - 22 % de los casos) y en sectores o barrios como: Barrios Unidos del Sur (Córdoba, La Milagrosa, La Suiza y La Unión), La Estación, Nuevo Horizonte, La Trinidad, Santa Elena, Las Lavanderas, Manantial 1, Rotatorio, San Roque, San Vicente, San Eugenio, Villa Alegría, y Plaza de Ferias. Información consistente con los resultados simulados (Figura 8).



Figura 8. Zonas bajo amenaza de inundaciones del río San Eugenio (Tr = 500 años)
Fuente: elaboración propia y RCN, 2022

Se entiende que, la amenaza es la probabilidad -peligro latente- de ocurrencia en el futuro, en un sitio y tiempo definidos de un fenómeno destructivo (natural, social y/o tecnológico) que genere impactos adversos en personas, bienes, producción, infraestructura y/o el ambiente expuesto (IDEAM, 2017). Para este caso de estudio, analizando en conjunto altura y velocidad de la lámina de agua, multiplicando la una por la otra, se construye el mapa de amenaza.

Así pues, se empleó la compilación de los criterios de la Agencia Federal para Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA por sus siglas en inglés) (ver Tabla 3), y de la Sociedad Americana de Ingeniería Civil (ASCE por sus siglas en inglés) (ver Tabla 4); teniendo en consideración al menos tres condiciones hidráulicas diferentes en la zona de inundación: caminos preferentes del flujo de la inundación, zonas de almacenamiento y franjas de desborde (IDEAM 2017).

Tabla 3. Criterios FEMA simplificados de la categorización de la amenaza
 Fuente: IDEAM, 2017

CATEGORÍA DE SEVERIDAD DE INUNDACIÓN	ALTURA (m) x VELOCIDAD (m/s)
Baja	< 0.2
Media	0.2 - 0.5
Alta	0.5 - 1.5
Muy Alta	1.5 - 2.5
Riesgo Extremo	>2.5

Tabla 4. Criterios ASCE para definir la amenaza de inundación
 Fuente: IDEAM, 2017

AFECTACIÓN	CRITERIO		
	ALTURA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ALTURA (m) x VELOCIDAD (m/s)
Vidas humanas	>1	>1	>0.7
Edificios y estructuras	>3.6	-	>6

Criterios que fueron compilados, de manera que se pudiera definir la zonificación de la amenaza:

Tabla 5. Compilación de criterios para definir la zonificación de la amenaza

Fuente: adaptado de IDEAM, 2017

ALTURA (m) x VELOCIDAD (m/s)	ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA
< 0.2	Baja
0.2 - 0.7	Media
> 0.7	Alta

Con esto se zonifica la amenaza por inundación, según (IDEAM 2017) (ver Figura 9); detallando sectores y/o barrios con historial de inundación (Figura 10). Amenaza que se agrava por la presencia de viviendas cerca al cauce del río San Eugenio (en su mayoría construcciones informales), lo que puede confluir en pérdidas humanas y materiales (Cámara de Comercio de Santa Rosa de Cabal, 2011).

A esta problemática se suma la presencia de puentes (ver Figura 3) que actúan como “canaletas Parshall” disminuyendo el área de tránsito del río y, por ende, aumentando su velocidad de flujo para luego dar paso a una sedimentación y acumulación con basuras que conlleva también a una disminución del área transversal, redistribuyendo el flujo hacia la orilla lo que hace que en muchos barrios se aceleren los procesos erosivos.



Figura 9. Resultado cálculo amenaza por inundación para TR = 100 y 500 años
Fuente: elaboración propia

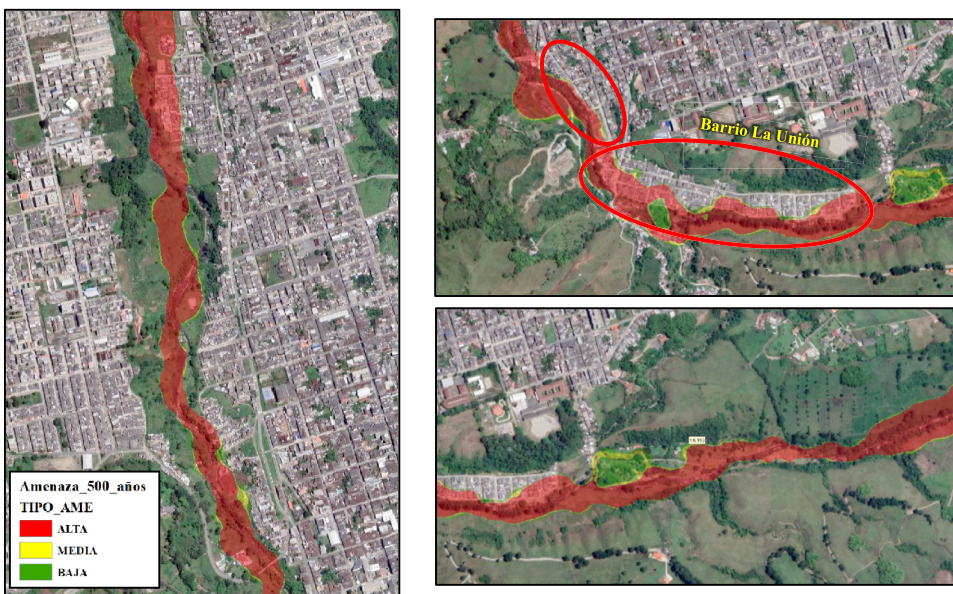


Figura 10. Zonas en condición de amenaza por inundaciones del río San Eugenio (Tr = 500 años)
Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

- Los barrios identificados en condición de amenaza alta por posibles avenidas del río San Eugenio son: Barrios Unidos del Sur (Córdoba, La Milagrosa, La Suiza y la Unión), La Estación, Nuevo Horizonte, La Trinidad, Santa Elena, Las Lavanderas, Manantial 1, Rotatorio, San Roque, San Vicente, San Eugenio, Villa Alegría, y Plaza de Ferias.
- Las zonas de amenaza coinciden con los sitios que históricamente han soportado los mayores impactos de eventos del río San Eugenio cuando se presentan crecientes y avalanchas torrenciales.
- Las alturas de lámina de agua calculadas muestran que para un periodo de retorno de 100 años se obtienen profundidades máximas entre 8.75 m y 7.01 m, mientras que, para un periodo de 500 años, las profundidades máximas aumentan ligeramente, entre 9.00 m y 7.94 m. Esto permite conocer los niveles que puede alcanzar el río en eventos extremos.
- En algunas áreas específicas del talweg o lecho principal, las velocidades del flujo pueden alcanzar los 12 m/s. Se registran velocidades promedio que oscilan entre 6.88 m/s y 6.12 m/s, lo cual es característico de situaciones de crecidas en ríos de montaña, donde la pendiente y la forma del lecho propician el rápido flujo del agua.
- Los hallazgos del modelo hidráulico desempeñan un papel fundamental en la identificación de las zonas propensas a inundaciones y en la creación de zonas de amenaza dentro del área urbana. Estos resultados son esenciales para la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio y la formulación del Plan de Gestión del Riesgo.

- Mediante los criterios de FEMA y ASCE se consideran la combinación de la altura del agua y la velocidad del flujo, se categoriza el nivel de amenaza en términos de baja, media o alta. Este enfoque resulta valioso para establecer restricciones en el uso del suelo y para identificar ubicaciones de asentamientos vulnerables, con el fin de implementar acciones destinadas a reducir el riesgo y estar preparados para situaciones de emergencia.

- Se recomienda continuar el monitoreo hidrológico y topográfico detallado para mejorar progresivamente los modelos y contar con sistemas de alerta temprana efectivos.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía Municipal Santa Rosa de Cabal. (2022). Información básica Municipio de Santa Rosa de Cabal - Risaralda. Portal Web Alcaldía. <https://www.municipio.com.co/municipio-santa-rosa-de-cabal.html>

Aldesarrollo (2022). Zonificación de amenaza por inundaciones a escala rural (1:25.000) y urbana (1:5.000) para el municipio de Santa Rosa de Cabal, Risaralda. https://drive.google.com/file/d/1Zj1MmJ7bBOgA9wy3b2EXGPWcO1wxrtO7/view?usp=share_link

Aldesarrollo B (2022). Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala rural (1:25.000) y urbana (1:5.000) para el municipio de Santa Rosa de Cabal, Risaralda. https://drive.google.com/file/d/14NTTQDXfrNqHiikHts2zHN_rCDEM_QQd/view?usp=share_link

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

Bladé, E., Sánchez, M., Juny, Sánchez, H. P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable.

Cámara de Comercio de Santa Rosa de Cabal. (2011). ESTUDIO SOCIO-ECONÓMICO SANTA ROSA DE CABAL. <http://camarasantarosa.org/wp-content/uploads/2015/02/20130901163337INFORME-FINAL-ESTUDIO-SOCIOECONÓMICO-CC-SRC-2012-1-2.pdf>

Chow, V. Te. (2004). Hidráulica de Canales Abiertos. In McGraw Hill. <https://doi.org/9586002284>

Corporación Autónoma Regional de Risaralda - CARDER, & Corporación Autónoma Regional de Caldas - CORPOCALDAS. (2020). Ajuste del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Campoalegre y otros directos al Cauca-POMCA Campoalegre. https://drive.google.com/drive/folders/11iW3mHS2D6BMJ3d_GfRqS94exACR0322

Díez Herrera, A., Laín Huerta, R., & Llorente Isidro, M. (2006). Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones métodos, experiencias y aplicación (Instituto Geológico y Minero de España (ed.)).

EMPOCABAL S.A E.S.P. (2008). PLAN DE SANEAMIENTO Y MANEJO DE VERTIMIENTOS -PSMV. <https://www.empocabal.com.co/wp-content/uploads/2020/10/PSMV-final.pdf>

Gobernación de Risaralda. (2007). Atlas de Risaralda. Secretaría de Planeación Departamental.

IDEAM. (2006). ESTANDARIZACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS. In SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA (Vol. 2, p. 12). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2017). GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUÍA_METODOLÓGICA_MAPAS_INUNDACIÓN_MARZO_2018.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Guía Técnica De Criterios Para El. 128. http://www.andi.com.co/Uploads/Guia_AcotamientoRondas_Hidricas_CP.pdf

Posada, L. (1994). Hidráulica Fluvial: Transporte de Sedimentos (p. 265). Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas. Unidad Académica de Hidráulica. Sanchez, J. (2003). Manual De Referencia. 1-17. <http://www.jorgesanchez.net/web/css1.pdf>

Sanz-Ramos, M., Blade, E., & Palau Ibars, A. (2016). Iber: herramienta de simulación numérica para la evaluación de la habitabilidad para peces (HPU). Limnología 2016: XVII Congress of the Iberian Association of Limnology: Book of Abstracts, July, 125. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34538.52169>

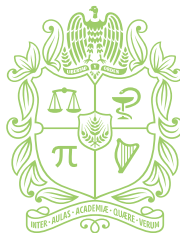
Tapia, G., Molina, J. P., Pérez, B., & Torres, A. (2012). Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico [SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES]. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt356.pdf>

Tipan Casa, E. P. (2016). Modelación Numérica Del Flujo Rasante En Una Rápida Escalonada Aplicando La Dinámica De Fluidos Computacional (CFD). Programa FLOW-3D. (p. 226). EPN.

Wikipedia.org. (2022). Localización Santa Rosa de Cabal - Risaralda. https://es.wikipedia.org/wiki/Santa_Rosa_de_Cabal#/media/Archivo:Colombia_-_Risaralda_-_Santa_Rosa_de_Cabal.svg

Yara, F. A. (2019). Estudio hidráulico del meandro del río Magdalena, municipio de La Dorada Caldas [Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75945>

Yara, F. A., & Franco, F. L. (2022). ESTUDIO DE INUNDACIÓN RÍO SAN EUGENIO SANTA ROSA DE CABAL - RISARALDA. In Universidad del Atlántico & Universidad del Valle (Eds.), Memorias Conferencia Internacional Agua 2022 (p. 250). <https://www.uniatlantico.edu.co/evento-agua-2022/>



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA -
Teléfono: 8879300 Ext. 50190
Cra 27 #64-60 / Manizales - Caldas
<http://idea.manizales.unal.edu.co>
idea_man@unal.edu.co

Edición, Diseño y Diagramación: IDEA Sede Manizales
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales