



**ACTUALIZACIÓN - ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RÍO SAN EUGENIO,
DETERMINACIÓN DE ZONAS DE AMENAZA POR INUNDACIÓN.
SANTA ROSA DE CABAL, RISARALDA.**

JUAN CAMILO RAMÍREZ CARMONA

20481613642

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PEREIRA, COLOMBIA

2023

**ACTUALIZACIÓN - ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RÍO SAN EUGENIO,
DETERMINACIÓN DE ZONAS DE AMENAZA POR INUNDACIÓN.**

SANTA ROSA DE CABAL, RISARALDA.

JUAN CAMILO RAMÍREZ CARMONA

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

FABIÁN ANDRÉS YARA AMAYA

INGENIERO CIVIL

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

MAGÍSTER EN INGENIERÍA - RECURSOS HIDRÁULICOS:

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

HIDRÁULICA Y GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PEREIRA, COLOMBIA

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Pereira, 2023.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	4
5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO IBER	7
6. METODOLOGÍA.....	9
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
8. CONCLUSIONES	18
9. BIBLIOGRAFÍA	20

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Localización Santa Rosa de Cabal.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Inundaciones causadas por el río San Eugenio.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3. Puentes sobre el río San Eugenio a su paso por el casco urbano.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4. Modelo digital de elevación.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5. Mallado y mapa de rugosidad empleado en el software IBER 2D (der).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 6. Manchas de inundación con lámina y velocidad – Tr 100 años.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 7. Manchas de inundación con lámina y velocidad - Tr =500 años.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8. Zonas vulnerables a inundaciones del rio San Eugenio (Tr = 500 años)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9. Resultado cálculo amenaza por inundación para TR = 100 y 500 años.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10. Zonas en amenaza por inundaciones del rio San Eugenio Tr = 500 años).....</i>	<i>17</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Número de familias afectadas por la ola invernal</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2. Caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno (años).....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 3. Criterios FEMA simplificados de la categorización de la amenaza</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 4. Criterios ASCE para definir la amenaza de inundación.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 5. Compilación de criterios para definir la zonificación de la amenaza</i>	<i>15</i>

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la fuerza divina que me ha guiado a lo largo de mi camino hasta este punto en mi vida. Agradezco por la sabiduría y el discernimiento que me han permitido avanzar hacia esta grandiosa meta.

También un agradecimiento muy especial a mi querida hija, Antonia Ramírez. Tu amor, y apoyo han sido fundamentales en la culminación de este trabajo de grado. A lo largo de este arduo proceso, tu presencia ha sido una fuente constante de inspiración y motivación. Gracias, Antonia, por ser mi fuente de luz y fortaleza en este viaje.

Mis padres, Luz Mery Carmona y Jaír Antonio Ramírez, merecen un agradecimiento especial, ya que a lo largo de estos años, han sido un apoyo inquebrantable. Siempre han estado a mi lado en los momentos difíciles y me han brindado orientación para tomar decisiones acertadas. Les agradezco por su amor, sus consejos y por impulsarme a avanzar en la vida.

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a mi amada novia, Mariana Ocampo, por su inmenso apoyo y comprensión a lo largo de este arduo viaje académico. Tu amor, paciencia y apoyo inquebrantable han sido una fuerza en mi vida y en la realización de este trabajo de grado. Tu constante apoyo moral y emocional me ha sostenido en los momentos más desafiantes. Gracias, Mariana, por ser mi fuente de inspiración y por compartir este logro conmigo. Tu presencia en mi vida ha hecho que cada paso en este camino sea más significativo. Gracias por nunca dejarme renunciar.

Agradezco al Ingeniero Fabian Andres Yara, cuya valiosa contribución ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo. Le agradezco sinceramente por invertir su valioso tiempo en transmitirme su conocimiento y en darme su voto de confianza en este proyecto.

Finalmente, extendo mi agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron para hacer realidad este sueño. Cada aporte, por pequeño que fuera, ha sido fundamental en mi viaje hacia el éxito.

1. RESUMEN

Se presenta un estudio para dilucidar el comportamiento hidráulico del río San Eugenio en Santa Rosa de Cabal (Risaralda), utilizando información hidrológica del IDEAM - 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 1 metro de profundidad. La importancia de este 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 a ser anegados, siendo un útil insumo para la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) municipal y la actualización del plan de emergencias de la ciudad.

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

2. ABSTRACT

This study is presented to elucidate the hydraulic behavior of the San Eugenio River in Santa Rosa de Cabal (Risaralda), using hydrological information from IDEAM - CARDER to incorporate it into the two-dimensional software IBER 3.3.1, and in this way calculate the floodable areas with information from water levels and velocities for return periods of 100 and 500 years. The results obtained allowed us to define the areas under threat of flooding, with the most affected sectors being those neighborhoods located in the floodplain (occupied with human settlements or socioeconomic activities) where the water height exceeds 1 meter in depth. The importance of this study with these characteristics is that, through simulations of different scenarios, it is possible to understand the dynamics of flooding and identify the sectors of the city susceptible to flooding, being a useful input for updating the Basic Plan of Municipal Territorial Planning (PBOT) and updating the city's emergency plan.

Keywords: fluvial hydraulics, floods, hydraulic modeling, hydrological modeling, threat zoning, risk management.

3. INTRODUCCIÓN

Para la modelación de las inundaciones del río San Eugenio en Santa Rosa de Cabal, se tomó como referencia los Planes de Ordenamiento y Manejo de las Cuencas - POMCAS de los ríos Otún y Campoalegre, información hidrológica del Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda – 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 a muy buen detalle las condiciones geomorfológicas de la zona; modelado topográfico digital al cual 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 siempre vez 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 además alimentar los modelos hidrológicos e hidráulicos a diferentes eventos hidroclimatológicos extremos.

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Santa Rosa de Cabal es un municipio colombiano localizado al suroriente del departamento de Risaralda en las coordenadas $4^{\circ} 52'$ de latitud norte y $75^{\circ} 37'$ 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 Mpal Santa Rosa, 2022) (Yara & Franco, 2022).

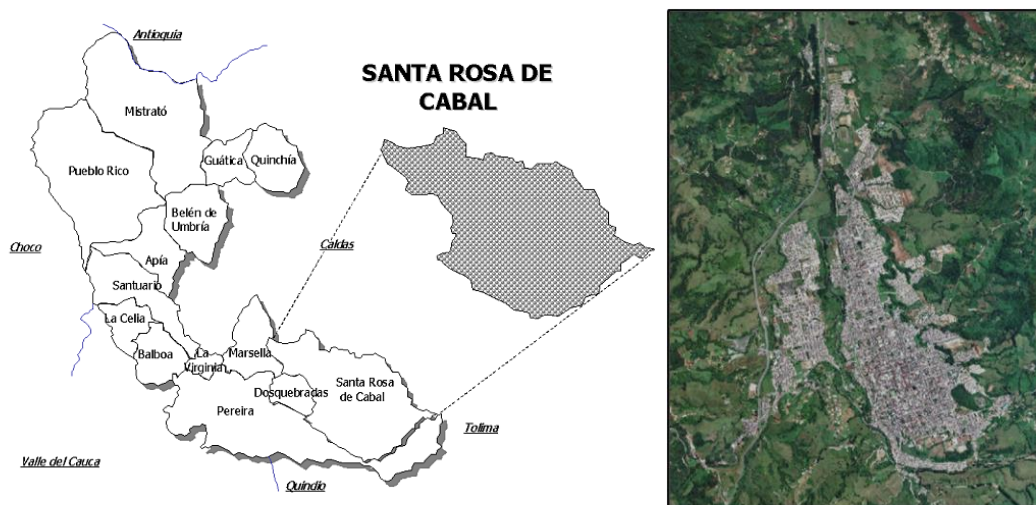


Figura 1. Localización Santa Rosa de Cabal.

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, la cuenca media del río San Eugenio presenta altas precipitaciones de elevada intensidad y duración que sumadas a su geomorfología la hacen propensa al riesgo asociado con avenidas torrenciales; presentándose caudales máximos que puede alcanzar la capacidad de transporte de materiales de gran tamaño que combinado con los

procesos de agradación y degradación a causa de intervenciones antrópicas junto con la exposición de asentamientos ubicados en el área de influencia del río, agravan en gran medida las afectaciones en la población.

Se resalta el evento de 1987 donde resultaron afectadas 2500 personas y destruidas 500 viviendas (EMPOCABAL S.A E.S.P, 2008) y siendo los últimos los de 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 (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 (el río San Eugenio, al pasar por el casco urbano, atraviesa varios puentes que estrechan su sección, complicando el problema de circulación de los flujos torrenciales) (ver figura 3) que sumado a las quebradas afluentes conectadas que, actualmente se encuentran contaminadas con escombros y basuras, 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 agravando la situación por temáticas de salud pública.

Pero ha sido el crecimiento poblacional, comercial, turístico y de servicios con sus vertimientos de residuos líquidos y sólidos; la deforestación para criar ganado, plantar o construir -incluso en las márgenes del río- quienes han generado cambios en el suelo y lo desestabilizan disminuyendo la infiltración, generando mayores escorrentías e incrementando la erosión y la contaminación. Lo que ha disminuido la oferta hídrica en cantidad y calidad, y en épocas de fuertes lluvias ha producido grandes crecientes - súbitas- con pérdida de vidas humanas y bienes.



*Figura 3. Puentes sobre el río San Eugenio a su paso por el casco urbano.
Fuente: Adaptado de google earth 2023.*

5. 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, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota de fondo, τ_s la fricción de superficie libre con la ecuación de Van Dorn, τ_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 $k - \varepsilon$ de Rastogi y Rodi, útil para una amplia gama de flujos (Tipan Casa, 2016).

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

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad [5]$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\varepsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho |U|^2} \quad [6]$$

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

6. METODOLOGÍA

Para representar el comportamiento del río San Eugenio a su paso por el caso urbano de Santa Rosa, 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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). 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 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.

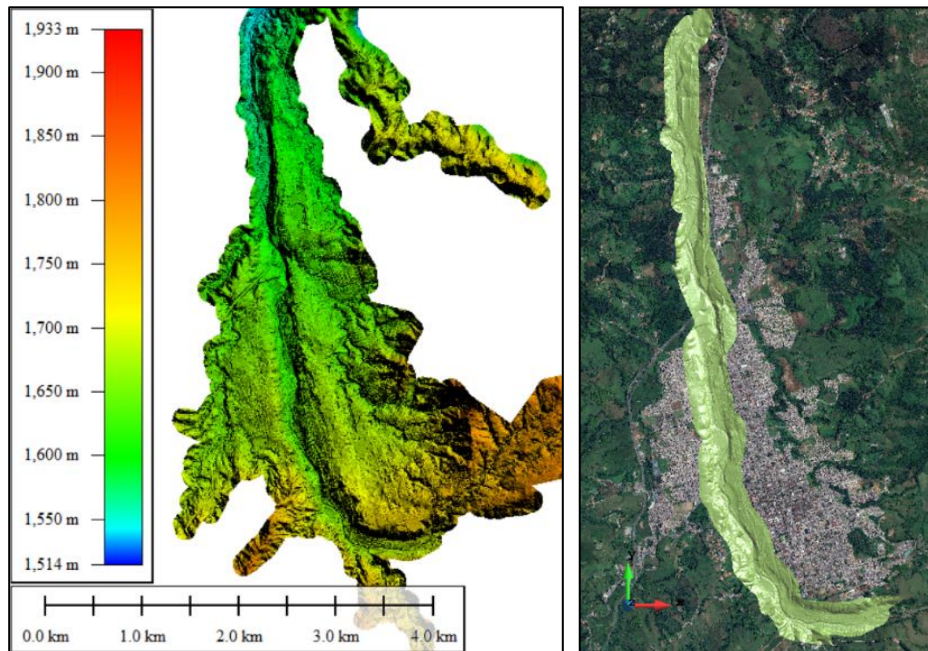


Figura 4. Modelo digital de elevación
Fuente: elaboración propia

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 generar 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 a 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 30000 segundos, llevándose el cálculo a 8 horas.

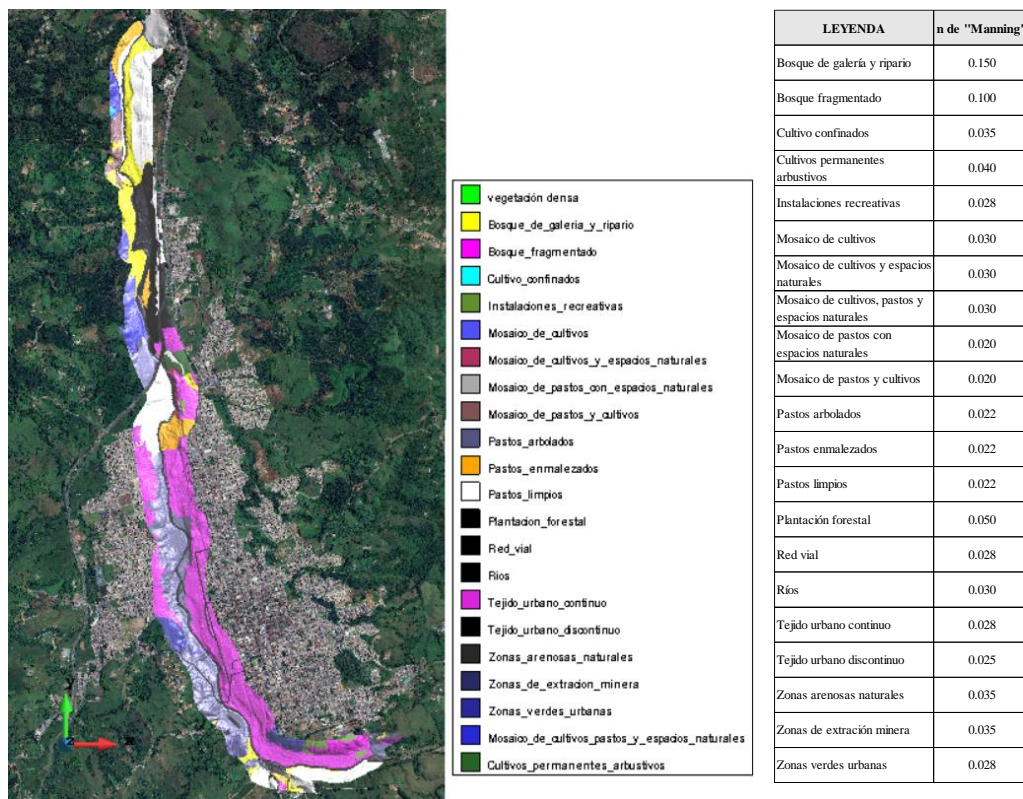


Figura 5. Mallado y mapa de rugosidad empleado en el software IBER 2D (der).

Fuente: elaboración propia

4. Calibración y validación del modelo hidráulico.

Si bien no se contó con información completa 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).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) y 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).

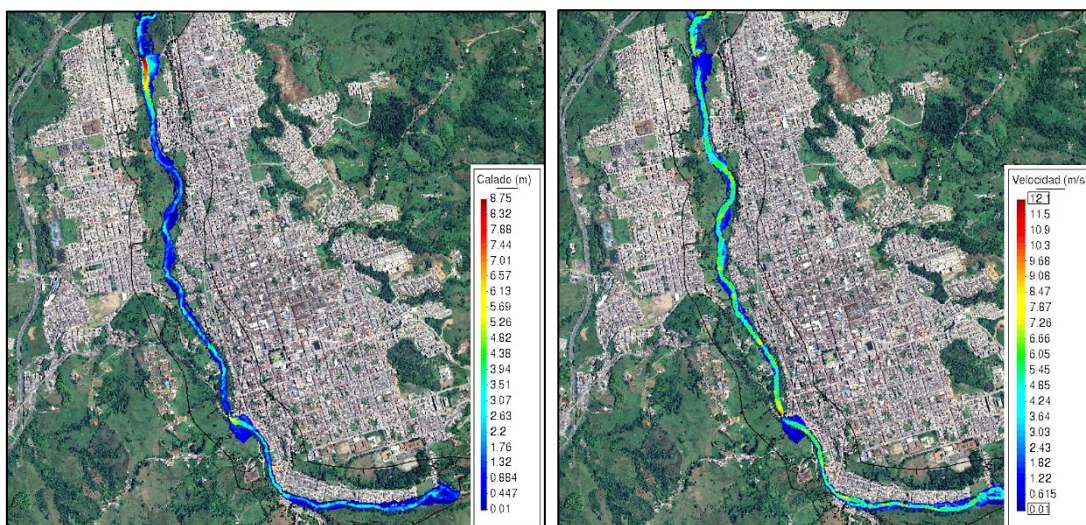


Figura 6. Manchas de inundación con profundidad de lámina y velocidad - periodo de retorno 100 años.
Fuente: elaboración propia.

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 $Tr = 100$ años ($Q = 196.0 \text{ m}^3/\text{s}$) 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.

En la figura 7 a $Tr = 500$ años ($Q = 249.1 \text{ m}^3/\text{s}$), obviamente con un caudal mayor por el más amplio periodo de retorno, 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.

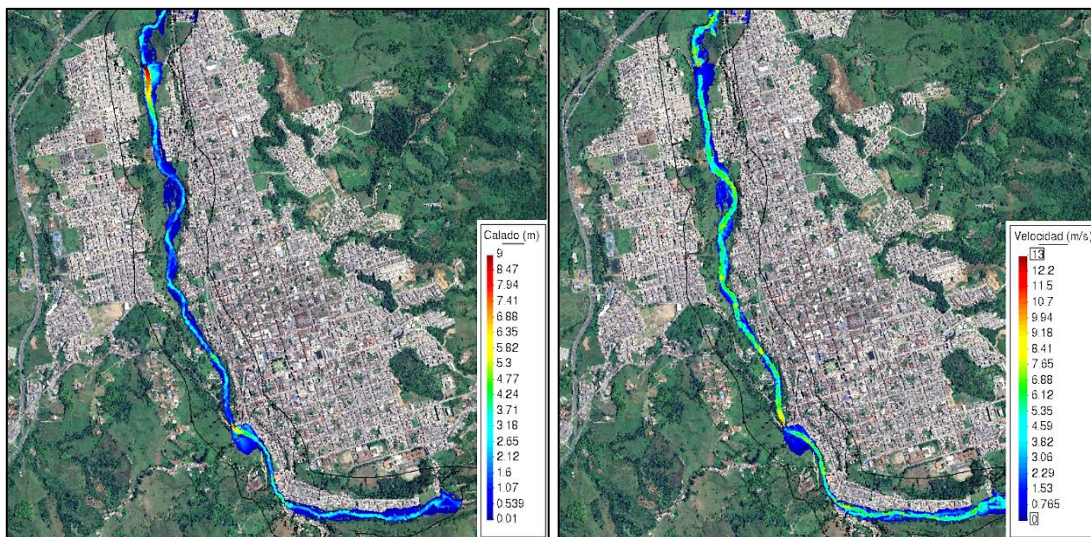


Figura 7. Manchas de inundación con profundidad de lámina y velocidad - periodo de retorno 500 años.
Fuente: elaboración propia.

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. Como es característico de las avenidas torrenciales, estas son condicionadas por flujos “acelerados” y vórtices que producen erosión de las orillas (ríos de montaña) (Posada, 1994) donde la pendiente prevalece y, en consecuencia, se dan altas velocidades; pero también por la disposición de

sedimentos acumulados (Tapia et al., 2012) que ha quedado tras anteriores eventos o en el normal discurrir del cauce.

Comparando los resultados con lo reportado por la Gobernación de Risaralda (2007) como las amenazas más significativas del municipio de Santa Rosa de Cabal, se encuentran las inundaciones y avalanchas del río San Eugenio 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 vulnerables a inundaciones del río San Eugenio ($Tr = 500$ años)
Fuente: elaboración propia.

Entiendo 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 confluír en pérdidas humanas y materiales (Cámara de Comercio de Santa Rosa de Cabal, 2011), razón por la cual las inundaciones son los eventos más reportados en el municipio (31 eventos - 22% de los reportes) según la base de datos de desastres Desinventar.

A esta problemática se suma la presencia de estructuras hidráulicas (puentes) (ver figura 3) que actúan como una “canaleta 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 y a que se redistribuya el flujo hacia la orilla haciendo que en muchos barrios se aceleren los procesos erosivos de orilla.

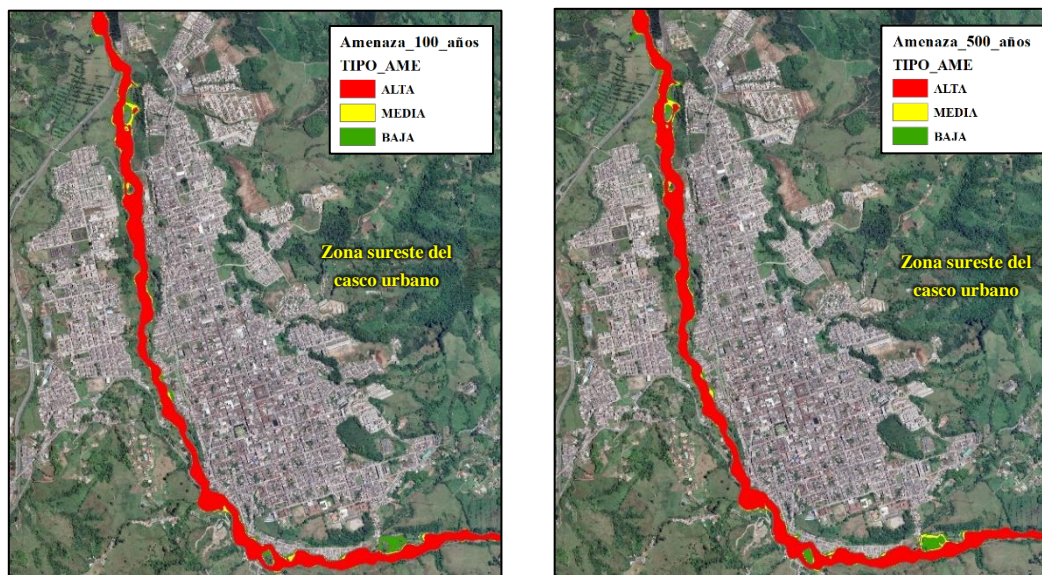


Figura 9. Resultado cálculo amenaza por inundación para TR = 100 y 500 años.

Fuente: elaboración propia.

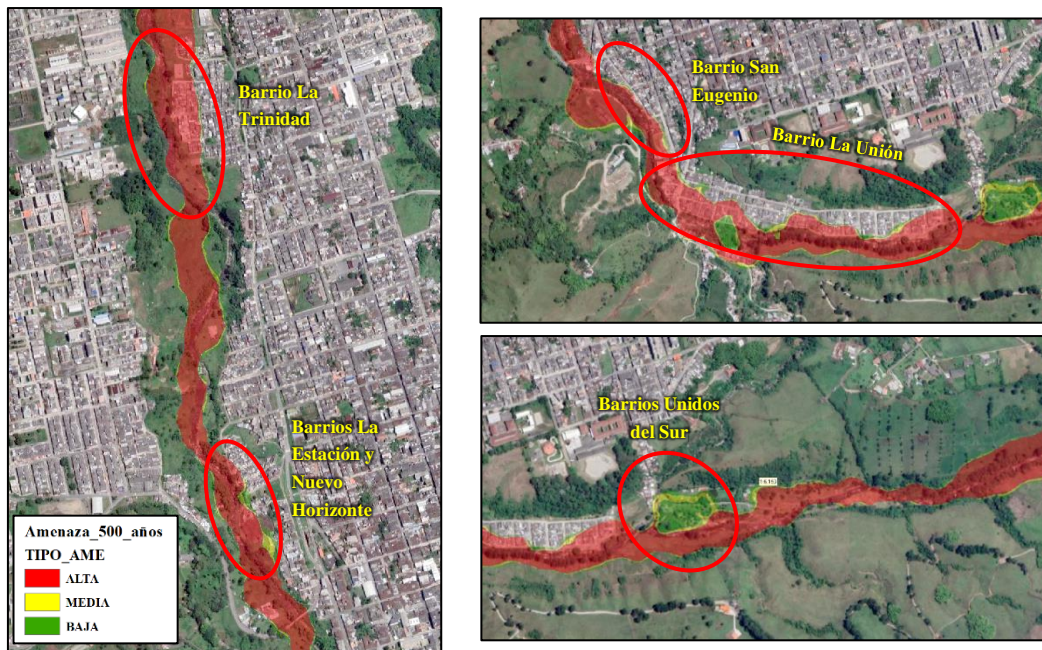


Figura 10. Zonas en condición de amenaza por inundaciones del río San Eugenio ($Tr = 500$ años)

Fuente: elaboración propia.

8. CONCLUSIONES

1. Los barrios identificados en condición de amenaza alta por posibles inundaciones 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.
2. Las zonas de amenaza coinciden con los sitios que históricamente han soportado los mayores impactos de eventos de inundación del río San Eugenio cuando se presentan crecientes y avalanchas torrenciales.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

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

9. 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>

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 Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 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 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 SOCIOECONOMICO-CC-SRC-2012-1-2.pdf>

Chow, V. Te. (2004). *Hidraulica 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. Secretaria 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/GUIA_METODOLOGIA_MAPAS_INUNDACION_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). Modelacion Numerica Del Flujo Rasante En Una Rapida Escalonada Aplicando La Dinamica 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/>