

Estudios Básicos de Amenaza por Inundación y Avenida Torrencial para los Centros Poblados de Aguaclara y Tienda Nueva en zona rural del municipio de Palmira



ESTUDIO 12: ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN AGUACLARA ESCALA 1:2000



Adición al Convenio Interadministrativo MP968 de 2021

OBSERVATORIO SIMOLOGICO Y GEOFISICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO (OSSO), UNIVERSIDAD DEL VALLE

ALCALDÍA DE PALMIRA, DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES-DGRD



Alcaldía de Palmira



Universidad
del Valle



**Estudios Básicos de Amenaza por Inundación y Avenida Torrencial para los Centros Poblados de Aguaclara y Tienda Nueva en zona rural del municipio de Palmira
Adición al Convenio Interadministrativo MP968 de 2021**



Alcaldía de Palmira

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PALMIRA

ÓSCAR EDUARDO ESCOBAR GARCÍA

Alcalde

FERNANDO JAVIER LEAL LONDOÑO, Ing.
Director de Gestión del Riesgo de
Desastres

CAMILO A. SAAVEDRA ESCOBAR, Adm.
Director 2021 – 2022 DGRD

ADRIANA TERREROS, Ing. Agrónoma
Profesional de Planta DGRD

OMAR A. CHAVES MONCAYO, Ing. Civil
Contratista DGRD

DIANA AREVALO, Ing. Civil
Contratista Oficina de Planeación

OBSERVATORIO SISMOLOGÍCO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO UNIVERSIDAD DEL VALLE

ELKIN DE JESUS SALCEDO HURTADO, Ph.D.
Director de Proyecto Estudios de Amenaza de Palmira - Director OSSO

DIANA M. RIVERA JIMENEZ
Coordinadora Administrativa

JHONATTAN FERNANDEZ C., MSc.
Coordinador Técnico

EQUIPOS TEMÁTICOS

HISTORICIDAD

KAREN A. SÁNCHEZ E., Geógrafa
Líder Equipo

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

JUAN CARLOS FLORES, Geól.
Líder Equipo

ESTEBAN A. NOREÑA, Geól.
Profesional de Apoyo

MARIA ALEJANDRA VELEZ, Geól.
Profesional de Apoyo

SIG Y TOPOGRAFÍA

JHON JAIRO BARONA, Ph.D.
Líder Equipo

PAOLA T. GOMEZ, Geóg.
Profesional de SIG

JORGE A. DÍAZ, Geóg.
Profesional de SIG

LINA ESPINAL, Ing.
Profesional de SIG

MIREYA LÓPEZ BOTERO, Ing.
Profesional de Topografía

ALEJANDRO FERNANDEZ, Téc.
Apoyo Topografía

AMENAZA INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL

RAFAEL CLEMENT, Ing.
Profesional Hidráulica Amenaza por Avenida Torrencial

NOVIEMBRE DE 2022

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivos específicos.....	5
3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
3.1. Área de estudio	6
4. CONCEPTUALIZACIÓN	8
4.1. Modelación hidráulica (HEC-RAS) para análisis de inundaciones	8
4.1.1. Descripción del modelo hidráulico a desarrollar mediante el software HEC-RAS 6.2 aspectos teóricos.....	8
4.1.2. Metodología.....	19
4.1.3. Clasificación de la cobertura.....	20
4.1.4. Configuración del modelo (geometría).....	23
4.1.5. Condiciones de frontera.....	26
4.1.6. Resultados	28
5. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES A ESCALA 1:2.000	37
5.1. Consideraciones generales conceptuales sobre las inundaciones.....	37
5.1.1. Medidas para el control y el manejo de inundaciones.....	38
5.1.2. Medidas estructurales.....	39
5.1.3. Medidas no estructurales.....	40
5.2. Metodología.....	40
5.2.1. Niveles de frecuencia de los eventos de inundaciones	40
5.2.2. Niveles de intensidad o magnitud de los eventos de inundaciones.....	41
5.2.3. Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones.....	43
5.3. Mapas de amenaza por inundación por desbordamiento.....	44
6. CONCLUSIONES	55
7. REFERENCIAS	56
8. ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del municipio de Palmira	6
Figura 2. Localización Centro Poblado Aguaclara	7
Figura 3. Medición de distancias con medida de fase	9
Figura 4. Propiedades de las celdas en una malla computacional	18
Figura 5. Imágenes de referencia de cauces y sus valores de rugosidad n de Manning	21
Figura 6. Distribución en planta de las rugosidades n de Manning	23
Figura 7. Propiedades de la malla del modelo de HEC-RAS	24
Figura 8. Configuración geométrica del modelo HEC-RAS para el análisis de inundaciones	25
Figura 9. Configuración geométrica del puente 1 vista en sección	26
Figura 10. Configuración geométrica del puente 2 vista en sección	26
Figura 11. Hidrogramas de crecientes ingresados al modelo.....	27
Figura 12. Resultados profundidades y velocidades (Tr _{2,33} años).....	28
Figura 13. Resultados profundidades y velocidades (Tr ₀₀₅ años).....	29
Figura 14. Resultados profundidades y velocidades (Tr ₀₁₀ años).....	29
Figura 15. Resultados profundidades y velocidades (Tr ₀₂₅ años).....	30
Figura 16. Resultados profundidades y velocidades (Tr ₀₅₀ años).....	31
Figura 17. Resultados profundidades y velocidades (Tr ₁₀₀ años).....	31
Figura 18. Localización de las secciones y perfil del río	32
Figura 19. Perfil de lámina de agua (Tr ₁₀₀)	33
Figura 19. Sección transversal río Aguaclara (SEC-01)	34
Figura 20. Sección transversal río Aguaclara (SEC-02)	35
Figura 21. Sección transversal río Aguaclara (SEC -03)	35
Figura 22. Sección transversal río Aguaclara (SEC 04)	36
Figura 22. Sección transversal río Aguaclara (SEC 05)	36
Figura 18. Nivel de intensidad o magnitud de la amenaza por inundaciones.	43
Figura 19. (INU-TN-2) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara- Periodo de retorno de 2,33 años	47
Figura 20. (INU-TN-3) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 5 años	48
Figura 21. (INU-TN-4) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 10 años	49
Figura 22. (INU-TN-5) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 25 años	50
Figura 23. (INU-TN-6) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 50 años	51
Figura 24. (INU-TN-7) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 100 años	52
Figura 25. (INU-TN-8) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara – Mapa de zonificación final.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comunas de la zona rural de Palmira	7
Tabla 2. Valores de la constante adimensional “D”	11
Tabla 3. Cálculo de la rugosidad n de Manning en el cauce principal	21
Tabla 4. Valores de Manning adoptados	22
Tabla 5. Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones	39
Tabla 6. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones.....	41
Tabla 7. Nivel de intensidad o magnitud del evento de inundación	42
Tabla 8. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación	43
Tabla 9. Clasificación de la amenaza por inundaciones	44

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe contiene los estudios para el análisis de la amenaza por inundación para el centro poblado de Aguaclara en el municipio de Palmira, en el departamento del Valle del Cauca.

Como insumo se parte de los resultados del estudio hidrológico, donde se determinaron los hidrogramas de crecientes, según el modelo de la modelación hidrológica desarrollado en HEC-HMS. Se realiza un análisis del tipo de superficies en la totalidad del área de modelación, a través de una clasificación con herramientas SIG, en aras de obtener la distribución espacial de las rugosidades.

El modelo hidráulico se desarrolla empleando el software HEC-RAS en su versión 6.2, desarrollado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE), para 11 escenarios de modelación, cada uno correspondiente a un periodo de retorno de 1 vez en 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años. La modelación se realiza a través de un modelo bidimensional.

Finalmente, se desarrolla los mapas de amenaza de amenaza por inundación, a partir de los resultados del modelo hidráulico, a través de una clasificación y cálculo de los archivos SIG.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos específicos

- Recopilar la información necesaria para la construcción del modelo hidráulico.
- Realizar la modelación hidráulica para el análisis de inundaciones en el centro poblado de Aguaclara, en zona rural del municipio de Palmira.
- Delimitar las zonas de amenaza, en niveles alto, medio y bajo para el centro poblado de Aguaclara, en zona rural del municipio de Palmira.

3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Área de estudio

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región Suroriente del departamento del Valle del Cauca (**Figura 1**) y se localiza alrededor de los 03°31'39" de latitud Norte y 76°18'01" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al Norte con el municipio de El Cerrito, al Sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al Este con el departamento del Tolima y al Oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes.

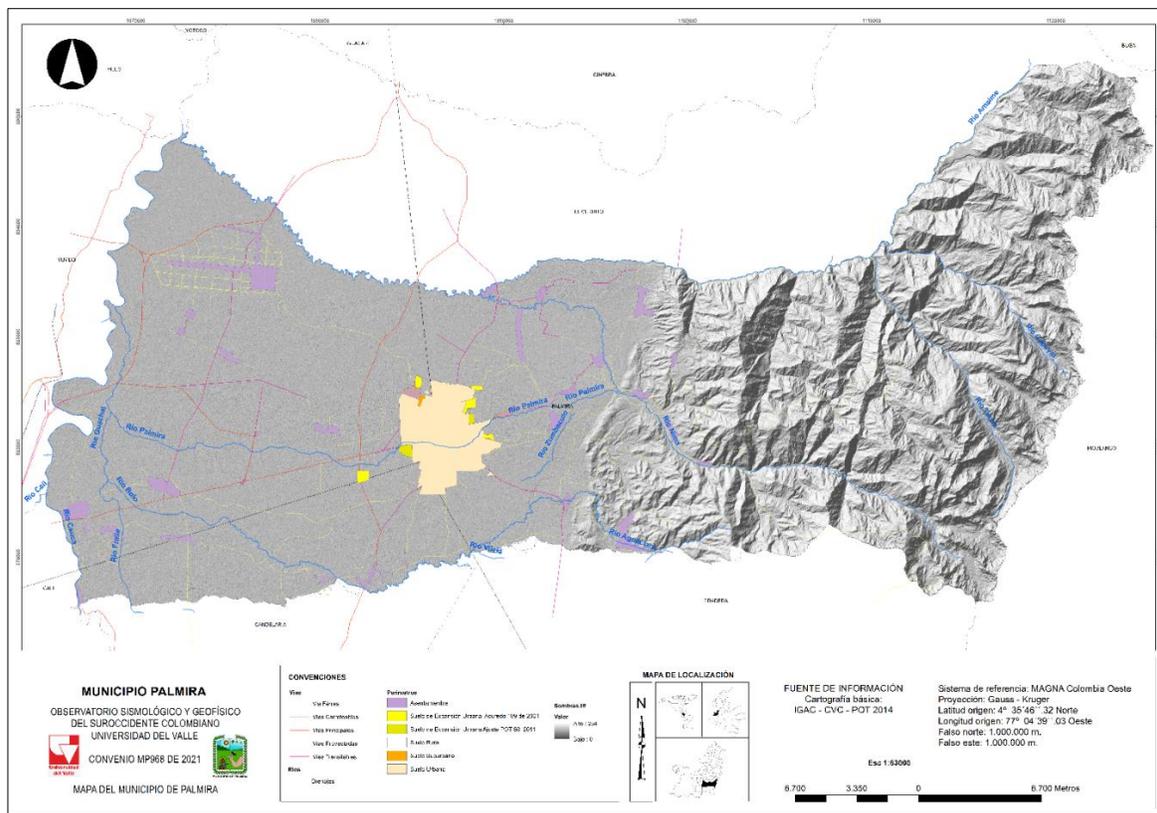


Figura 1. Localización del municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia.

El municipio cuenta con un área aproximada de 100.000 Ha y se divide en dos grandes zonas fisiográficas de Este a Oeste: la zona montañosa y de piedemonte, y la zona plana asociada al valle geográfico del río Cauca sobre la cual se encuentra ubicada la cabecera urbana del municipio. Cuenta con una cantidad aproximada de población, según proyecciones DANE a 2021, de 356.000 habitantes; la gran mayoría concentrados en la cabecera urbana con un aproximado de 281.000 habitantes y unos 74.000 habitantes en los demás centros poblados y rural disperso.

El centro poblado de Aguaclara hace parte del sistema de asentamientos rurales del municipio y corresponde a uno de los centros poblados principales del corregimiento que lleva su nombre (**Tabla 1**).

Tabla 1. Comunas de la zona rural de Palmira

Comuna	Corregimiento	No. Corregimientos
8	Rozo, La Torre, La Acequia.	3
9	Matapalo, Obando, La Herradura, Palmaseca, Coronado (rural), Zamorano (rural).	6
10	La Dolores, Guanabanal, Caucaseco, Juanchito.	4
11	Bolo San Isidro, Bolo Italia, Bolo Alizal.	3
12	Amaime, Boyacá, La Pampa.	3
13	Tienda Nueva, Tablones, Guayabal, Barrancas.	4
14	La Zapata, Aguaclara , Ayacucho.	3
15	Combia, Toche.	2
16	Potrerrillo, Caluce, Tenjo.	3

Fuente: Alcaldía de Palmira, 2021.

Este centro poblado se encuentra ubicado sobre la parte plana proximal al piedemonte del flanco occidental de la Cordillera Central en las coordenadas 3°30'13"N - 76°14'12.0"W. La Figura 2 muestra la localización del centro poblado.

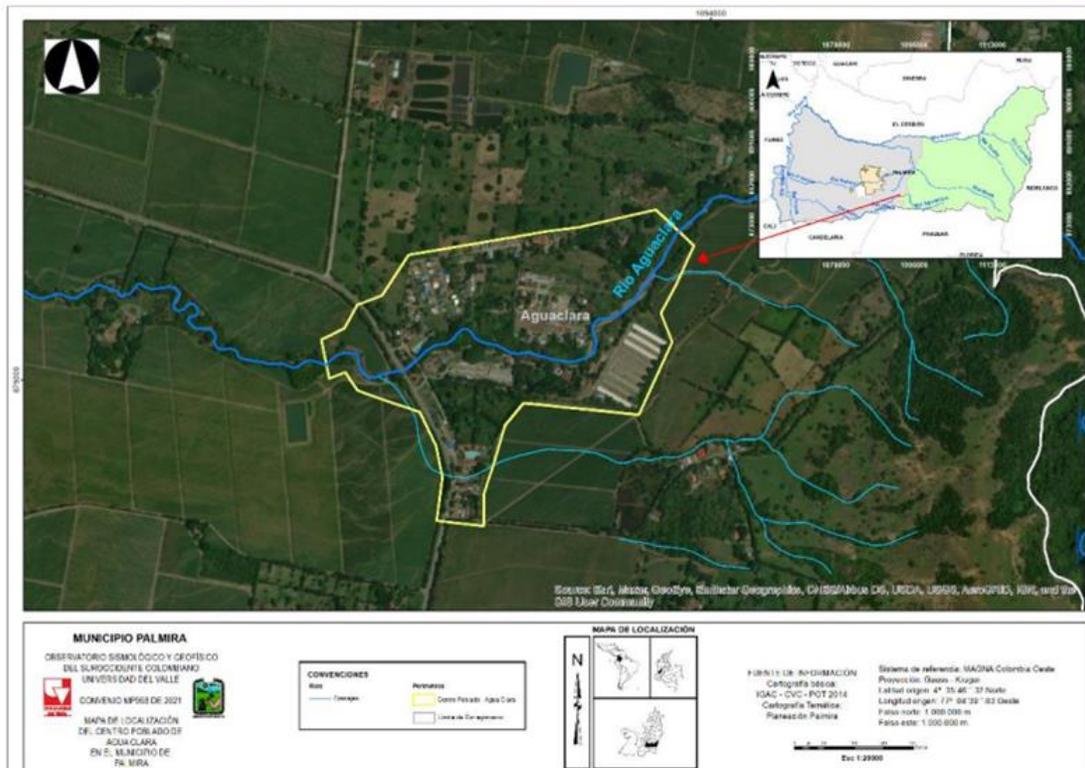


Figura 2. Localización Centro Poblado Aguaclara

Fuente: elaboración propia.

4. CONCEPTUALIZACIÓN

4.1. Modelación hidráulica (HEC-RAS) para análisis de inundaciones

4.1.1. Descripción del modelo hidráulico a desarrollar mediante el software HEC-RAS 6.2 aspectos teóricos

La herramienta computacional HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, por sus siglas en inglés) es un modelo de dominio público desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2021). HEC-RAS 2D es un software libre para realizar la modelación hidráulica bidimensional de cauces, puede determinar el tirante de agua y velocidad en cualquier punto del cauce de un río y áreas de probable inundación.

4.1.1.1. Ecuación gobernante de lámina libre de Saint Venant

La ecuación de lámina libre de Saint-Venant 2D utiliza como solución el método de volúmenes finitos implícitos, es similar a la formulación de las ecuaciones de Navier-Stokes, teniendo consideración el efecto de Coriolis, la cual permite tener en cuenta los efectos de rotación de la tierra sobre la solución del área de flujo 2D de la modelación hidráulica.

Las ecuaciones conservativas de continuidad y cantidad de movimiento de Saint-Venant Bidimensional considera lo siguiente:

- Flujo newtoniano ($\mu_{\text{agua}} = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- Distribución de la velocidad en toda la profundidad
- Velocidad y aceleración vertical son despreciables ($w = 0\text{ m/s}$ y $a_z = 0\text{ m/s}^2$)
- Flujo incompresible ($\rho_{\text{agua}} = 1000\text{ kg/m}^3$)
- Flujo No permanente (Variación de caudal en el tiempo)
- Efecto de Coriolis

A continuación, se detalla el desarrollo de las ecuaciones que gobiernan un flujo bidimensional de la lámina libre de Saint-Venant:

Ecuación de continuidad de flujo bidimensional de lámina libre de Saint-Venant

$$H_{(x,y,t)} = Z_{(x,y)} + h_{(x,y,t)} \text{ (Ecuación 1)}$$

De la Figura 3, “*H*” representa cota de la superficie de lámina libre de agua, “*h*” representa el tirante hidráulico de flujo, “*Z*” representa la cota de fondo del lecho del río. Se deduce la siguiente ecuación:

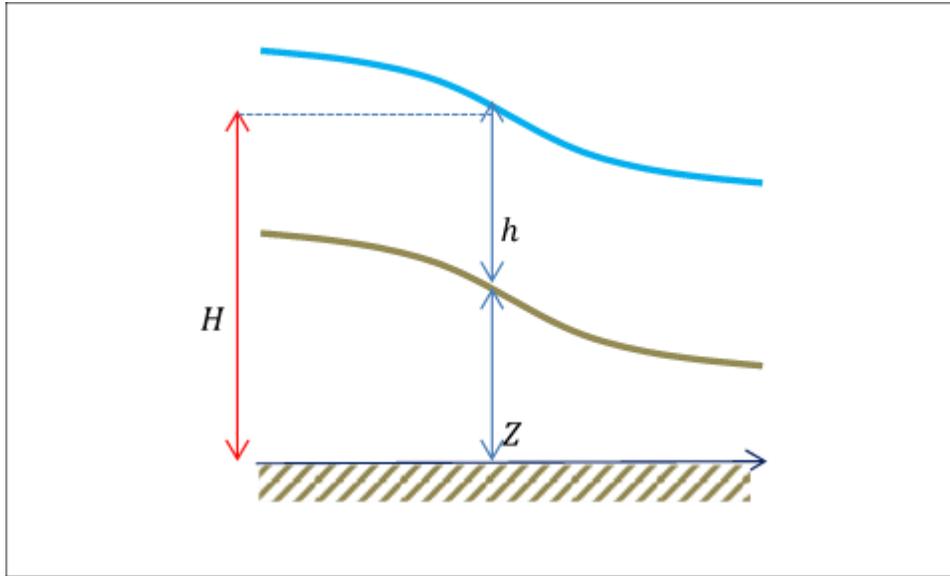


Figura 3. Medición de distancias con medida de fase
Fuente: Berné, Anquela y Garrido, 2014

Donde, las variables de la ecuación anteriormente descritas son variables dependientes de la posición (*x*, *y*) y el tiempo (*t*).

De la ecuación general de flujo bidimensional de lámina libre:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \text{ (Ecuación 2)}$$

El modelo HEC-RAS adiciona una variable “*q*” (infiltración).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + h \frac{\partial(u)}{\partial x} + h \frac{\partial(v)}{\partial y} + q = 0 \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde:

H: Cota de la superficie de lámina libre de agua

h: Tirante de agua

u: Velocidad en el eje “*x*”

v: Velocidad en el eje “*y*”

t: Tiempo

q: Infiltración del fondo de lecho

4.1.1.2. Ecuaciones de de cantidad de movimiento de flujo bidimensional de lámina libre de Saint-Venant

En las ecuaciones de cantidad de movimiento las variables de esfuerzos superficiales y de fondo, según el software HEC-RAS, solo se considera el esfuerzo de fondo de lecho mas no considera el esfuerzo superficial (resistencia al flujo por vegetación y viento); el modelo considera un parámetro de Coriolis “ f ” que afecta las velocidades en las dos direcciones “ x ” y “ y ”, dándole así este factor a las ecuaciones un parámetro de ajuste propios de los criterios de contracción y expansión de Saint Venant.

La ecuación de cantidad de movimiento en el eje “ x ” es:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + u_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \text{ (Ecuación 4)}$$

Y la ecuación de cantidad de movimiento en el eje “ y ” es:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + u_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \text{ (Ecuación 5)}$$

Cf: coeficiente de fricción de lecho, que depende del coeficiente de rugosidad

En HEC-RAS el coeficiente de rugosidad (Cf) representa el coeficiente de resistencia de flujo de manera general, tomando en cuenta la rugosidad del lecho, la rugosidad por vegetación, la rugosidad por sinuosidad, la rugosidad por obstrucción, etc.

El modelo bidimensional HEC-RAS (Brunner, 2016) en su procesamiento por el método de Volúmenes Finitos Implícitos (MVF- Implícitos) asume lo siguiente para las ecuaciones de cantidad de movimiento.

$$\mu_{xx} = \mu_{yy} = 0 \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde μ_{xx} , μ_{yy} son los coeficientes de viscosidad turbulenta axiales

Del mismo modo, HEC-RAS considera que los coeficientes de viscosidad de turbulencia tangenciales tendrán un valor único “ μ_t ” en las ecuaciones de la cantidad de movimiento:

$$\mu_{xy} = \mu_{yz} = \mu_{yx} = \mu_{xz} = \mu_t \text{ (Ecuación 7)}$$

Para la determinación del coeficiente de viscosidad turbulencia tangencial de flujo u_t se utiliza el modelo numérico de viscosidad de Eddy que plantea lo siguiente:

$$\mu_t = Dh \left[\frac{n\sqrt{g(u^2+v^2)}}{R^{1/6}} \right] \text{ (Ecuación 8)}$$

Donde:

μ_t : Coeficiente de viscosidad de turbulencia tangencial al flujo

h : Tirante de agua

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

g : Aceleración de la gravedad

u, v : Velocidades del flujo en las direcciones “ x ” y “ y ”

R : Radio Hidráulico

D : Constante adimensional del modelo HEC-RAS 2D

La constante adimensional “ D ” se determina a partir de la Tabla 2 propuesta por (Brunner, 2016).

Tabla 2. Valores de la constante adimensional “ D ”

D	Grado de Turbulencia	Superficie de Fondo
0.11 a 0.26	Pequeño	Superficies de lecho de fondo suaves
0.30 a 0.77	Moderado	Superficies de lecho de fondo moderadamente irregulares
2.00 a 5.00	Fuerte	Superficies de lecho de fondo muy rugosos

Fuente: elaboración propia

La constante gravitatoria “ g ” según (Brunner, 2016) está relacionada a las siguientes variables.

$$g = 9.780326 \left(\frac{1+k\sin^2\varphi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} \right) \text{ (Ecuación 9)}$$

Donde:

k : Contante gravitatoria normal ($k = 0.0019318$)

e : Excentricidad de la tierra ($e = 0.00669438$)

φ : Latitud del centro del área de flujo 2D, en grados decimales

- **Efecto de Coriolis**

El modelo HEC-RAS 2D considera un efecto de Coriolis que al multiplicar con la velocidad al eje “ x ” y “ y ” ajustan el modelo hidráulico.

$$f = 2\omega\sin\varphi \text{ (Ecuación 10)}$$

Donde:

ω : Es la velocidad angular sideral del terreno $\omega = 0.000072911/s$

φ : Latitud del centro del área de flujo 2D, en grados decimales

El valor de “ φ ” tiene los siguientes criterios: al ser mayor que cero se considera que está ubicado en el hemisferio norte y un valor menor que cero se considera localizado en el hemisferio sur.

- **Coeficiente de fricción del lecho**

La herramienta computacional HEC-RAS 2D se basa en la formulación de Chézy, Gauckler-Manning-Strickler, obteniéndose finalmente la siguiente expresión (Brunner, 2016).

$$C_f = \frac{n^2 g \sqrt{u^2 + v^2}}{R^{4/3}} \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

g : Aceleración de la gravedad

u, v : Velocidades del flujo en las direcciones “ x ” y “ y ”

h : Radio hidráulico

- **Método de Volúmenes Finitos**

El método de volúmenes finitos (MVF) aplicado en la herramienta computacional HEC-RAS 2D a las ecuaciones bidimensionales de flujo de lámina libre de Saint-Venant se basa en los criterios formulados por McDonald (Brunner, 2016) para la simulación de problemas bidimensionales de flujo hidráulico. Este método discretiza un subdominio del espacio físico (topografía del terreno) en poliedros (que son representados por celdas o superficies de 3 a 8 lados) del espacio físico, en los que previamente se realiza un mallado estructurado y no estructurado a la vez. La principal ventaja del método MVF es que la discretización espacial se lleva a cabo en el espacio físico. Por lo tanto, no hay problemas de la transformación a otros sistemas de coordenadas, como ocurre con el método de diferencias finitas (MDF).

- **Método de Volúmenes Finitos con Aproximación por la Divergencia de Gauss**

El método de volúmenes finitos (MVF) se basa en asignar puntos espaciados de manera aproximada sobre el dominio del espacio físico topográfico y aplicar las ecuaciones constitutivas de flujo (ecuaciones de flujo bidimensional de Saint-Venant del modelo HEC-

RAS) en cada punto del cauce del río y a los alrededores, como se puede observar en la configuración geométrica del método de volúmenes finitos del modelo HEC-RAS 2D.

El MVF tiene como punto de partida la ecuación de Poisson diferencial de aproximación, que indica que el laplaciano de una variable “u” a evaluar puede ser aproximado a una función “b”.

$$\nabla^2 u - b = R \approx 0 \text{ (Ecuación 12)}$$

Dónde:

$\nabla^2 u$: Operador Laplaciano diferencial de segundo orden en la variable “u”

b: Función de aproximación

R: Error residual

A partir de lo anterior se utiliza el método de ponderación de “residuos pesados” en el dominio “ Ω ” de geometría variable (celdas de 3 lados hasta 8 lados) que tiene un peso ponderativo propio que se considera único para cada celda, entonces la ecuación con este criterio se puede escribir de la siguiente forma:

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 u - b) \omega \partial \Omega = 0 \text{ (Ecuación 13)}$$

Donde:

$\nabla^2 u$: Operador Laplaciano diferencial de segundo orden en la variable “u”

b: Función de aproximación

ω : Función ponderativa ($\omega = 1$); en volúmenes finitos

Ω : Dominio superficial del elemento

De esta forma se obtiene lo siguiente para el volumen finito cuadrangular central:

$$\int_{\Omega} \nabla^2 \omega \partial \Omega = \int_{\Omega} b \partial \Omega = b \nabla_x \nabla_y \text{ (Ecuación 14)}$$

Dónde:

$\nabla^2 u$: Operador Laplaciano diferencial de segundo orden en la variable “u”

b: Función de aproximación

Ω : Dominio superficial del elemento

Δx , Δy : Dimensión en el eje “x” y “y” del volumen finito cuadrangular central.

Posteriormente, se procede a desarrollar la integral del Laplaciano de la variable de interés “ $\nabla^2 u$ ”; para tal caso se utiliza “Teorema de Divergencia de Gauss”

$$\int_{\Omega} \nabla^2 u d\Omega = \int_S (\nabla u \cdot \vec{n}) ds \text{ (Ecuación 15)}$$

Donde:

S: Dominio superficial para el flujo bidimensional

$\nabla u \cdot \vec{n}$: Derivada direccional

Por definición derivada se tiene:

$$\int_S (\nabla u \cdot \vec{n}) ds = \int_S \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) ds \text{ (Ecuación 16)}$$

Para obtener finalmente:

$$\int_S \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) ds = \int_S b d\Omega \text{ (Ecuación 17)}$$

Debido a que el dominio se dividió en volúmenes finitos en celdas (polígonos de 3 lados a 8 lados) se separa la integral en “i” dominios para cada uno de los cuales su frontera constara de “k” lados adyacentes (j=1,2,3,..., k=8 lados).

$$\int_S \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) ds = \sum_{j=1}^k \int_{\Gamma_{i,j}} \left(\frac{du}{d\vec{n}} \right) dS_i = \sum_{j=1}^k \left(\frac{u_j - u_i}{h} \right) L(\Gamma_{i,j}) \text{ (Ecuación 17)}$$

Dónde:

u: La variable diferencial

$du/(d\vec{n})$: Derivada direccional

l: Longitud tangencial de celda en la dirección de flujo

L: Longitud ortogonal de celda en la dirección de flujo

k: Numero de celdas de enmallado de la discretización

Obteniéndose de manera general en los ejes norte (N), sur (S), este (E) y oeste (W) de la celda central cuadrangular.

$$\left(\frac{u_{\omega} - u_i}{\Delta x} \right) \Delta y + \left(\frac{u_E - u_i}{\Delta x} \right) \Delta y + \left(\frac{u_N - u_i}{\Delta y} \right) \Delta x + \left(\frac{u_S - u_i}{\Delta y} \right) \Delta x = b \Delta x \Delta y \text{ (Ecuación 18)}$$

Dónde:

u_{ω} , u_E , u_N , u_S : Variable diferenciales de entrada en los distintos ejes cardinales

u_i : Variable diferencial de salida

$\Delta x, \Delta y$: Dimensión en el eje “x” y “y” del volumen finito cuadrangular central.

4.1.1.3. Divergencia de Gauss en las Ecuaciones de Flujo Bidimensional de Saint-Venant del Modelo HEC-RAS 2D

El desarrollo final de la introducción del método de volúmenes finitos a las ecuaciones de flujo que gobiernan el modelo bidimensional hidráulico de HEC-RAS 2D se describe a continuación. La formulación final de la aplicación del método de volúmenes finitos en la ecuación de continuidad (Brunner, 2016) es la siguiente:

$$\oint_S (H_n) dS \approx \sum_{r=1}^4 (H_r n_r) dS_r \text{ (Ecuación 19)}$$

Donde:

dS_r : Longitud en las cuatro paredes, en el contorno del mallado (i, j)

H_r : El flujo numérico de flujo a través de la celda de la que se enfrenta “r” contorno de la celda (i, j)

La evaluación del flujo numérico se explica aquí para la cara de la celda entre los nodos ($i + 1, j$) y (i, j); similarmente se adopta para otras caras de celdas.

$$(H_3 n_3) dS = (H_n)_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{1}{2} [H_R + H_L - \alpha(U_R - U_L)] n_{i+\frac{1}{2},j} \text{ (Ecuación 20)}$$

Donde:

$\alpha = a$: Coeficiente positivo

$H_R = f(UR)$: El flujo calculado utilizando la información del lado derecho de la cara de las celdas

$H_L = f(UL)$: El flujo calculado utilizando la información del lado izquierdo de la cara de las celdas UR y UL : son obtenidos usando las siguientes ecuaciones:

$$(U_L)_{i+\frac{1}{2},j} = U_{i,j} + \frac{1}{2} \delta U_{i,j} \text{ (Ecuación 21)}$$

$$(U_R)_{i+\frac{1}{2},j} = U_{i+1,j} - \frac{1}{2} \delta U_{i+1,j} \text{ (Ecuación 22)}$$

La integración de la ecuación en el dominio del tiempo se realiza mediante el uso de un enfoque predictor-corrector.

4.1.1.4. Condiciones de frontera del modelo hidráulico HEC-RAS 2D

Las condiciones de frontera para la modelación hidráulica bidimensional en flujo no permanente del modelo HEC-RAS pueden ser: la hidrógrafa de caudales, la hidrógrafa de niveles de agua, la profundidad normal y la curva de calibración nivel-caudal (Brunner, 2016), donde las dos primeras se emplean en las fronteras aguas arriba para ingresar el flujo al área y las dos últimas se utilizan en la frontera de aguas abajo, lo cual permite la salida del flujo.

4.1.1.5. Condiciones de rugosidad del cauce

El modelo hidráulico HEC-RAS 2D mantiene los conceptos de rugosidad general de Manning para canales abiertos para flujos unidimensionales, el cual tiene en cuenta lo siguiente:

- Rugosidad del lecho del cauce
- La resistencia al flujo por vegetación
- El grado de sinuosidad del cauce
- Las irregularidades del cauce
- Las obstrucciones existentes en el cauce

4.1.1.6. Capacidades y ventajas de la modelación de flujo en 2D con HEC-RAS

HEC-RAS en sus versiones superiores a 5.0 resulta novedosa por su análisis en 2D. Este tipo de modelación ha permitido que desarrolle nuevas capacidades para la simulación de flujo en 2D; así se puede ejecutar modelos en 1D, 2D o una combinación de ambos. Estas capacidades son descritas a continuación (información tomada del manual del usuario de HEC-RAS 2D (Chero, 2015).

- **Puede realizar modelación en 1D, 2D o una combinación de ambos**

La capacidad de ejecutar modelos combinados permite al usuario trabajar en amplios sistemas de ríos; por ejemplo, se puede usar el modelo 1D sobre el cauce de un río y el modelo 2D sobre las zonas adyacentes al mismo, en donde se requiere mayor detalle de los resultados hidráulicos.

- **Emplea las ecuaciones de Saint-Venant y Onda Difusa en 2D**

El programa permite elegir entre las ecuaciones de Saint-Venant y de Onda Difusa en 2D para llevar a cabo la modelación. De forma general, las ecuaciones de Onda Difusa en 2D permiten que el software procese la información rápidamente y tiene mayores propiedades

de estabilidad; sin embargo, las ecuaciones de Saint-Venant 2D son aplicables a una gama más amplia en la resolución de problemas.

- **Esquema numérico empleado: Volumen Finito Implícito**

El método de volúmenes finitos mejora la estabilidad y robustez del modelo con respecto a las técnicas de diferencias finitas y elementos finitos, pudiendo manejar adecuadamente situaciones de flujo en regímenes subcrítico, supercrítico y mixto.

- **Algoritmo de solución para el acoplamiento de modelos 1D y 2D**

Este algoritmo permite la retroalimentación directa en cada intervalo de tiempo entre los elementos de flujo 1D y 2D. Por ejemplo, el caso del río modelado en 1D que se conecta a cualquiera área (modelada en 2D) mediante algún dique (estructura lateral).

Si consideramos que el flujo se desplaza por encima del dique, o por efecto de la ruptura del dique, del modelo 1D hacia el 2D, entonces el programa emplea la ecuación de vertedero para resolver el cómputo del flujo. Por cada paso de tiempo, la ecuación de vertedero emplea los resultados de los modelos 1D y 2D permitiendo la contabilización exacta del vertedero sumergido.

- **Mallas computacionales estructuradas y no estructuradas**

HEC-RAS 6.0 fue diseñado para trabajar con mallas no estructuradas, pero también puede trabajar con mallas estructuradas. Las celdas computacionales de una determinada malla pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o polígonos de hasta 8 lados como máximo. La malla computacional no necesita ser ortogonal, sin embargo, si fuera así la discretización numérica es más simplificada y eficiente.

Cada celda de la malla computacional está compuesta de los siguientes elementos: centro de celda, contorno de celda y puntos en contorno de celda (Figura 4).

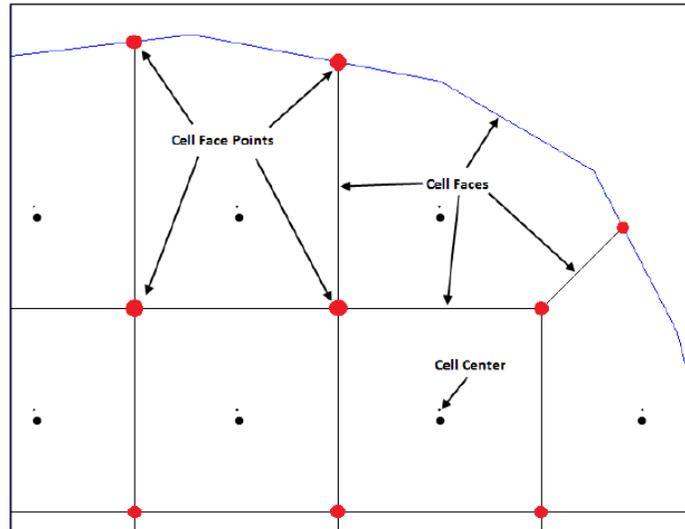


Figura 4. Propiedades de las celdas en una malla computacional
Fuente: (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2021)

HEC-RAS realiza el proceso de mallado computacional siguiendo la técnica de triangulación de Delaunay y luego construye un diagrama de Voronoi. El proceso es análogo a cuando se construye el polígono de Thiessen para atribuir un área de cuenca a un pluviómetro específico. La elección del tamaño de malla es uno de los pasos importantes a considerar. En general debe optarse por elegir la malla que mejor se adecúe al terreno que controlará el movimiento del flujo. Las variaciones del tamaño de malla deben hacerse de forma gradual con el fin de mejorar la precisión de cálculo.

- Tabla detallada de propiedades hidráulicas para celdas y contornos de celdas computaciones 2D

Cada celda y contorno de celda es preprocesada con la finalidad de obtener tablas de propiedades hidráulicas basadas en el terreno subyacente empleado en la modelación. Básicamente en el preproceso se calcula para cada celda la relación detallada de Elevación-Volumen y para cada contorno de celda calcula las relaciones Elevación-Perímetro Mojado, Elevación-Área, Elevación-Rugosidad y demás propiedades hidráulicas.

Estas relaciones que calcula el programa permiten al usuario crear celdas computacionales grandes, conservando los detalles del terreno, lo cual resulta ventajoso porque hace más rápido los tiempos de cálculo, pues genera mayores detalles hidráulicos a nivel de cada celda. La elección del tamaño de celda se basa en el nivel de detalle que se quiere obtener.

- Mapas detallados de inundación y animaciones

HEC-RAS, a través de su herramienta RAS Mapper, ofrece la posibilidad de visualizar mapas de zonas inundadas, así como la animación del flujo de agua cuando ocurre la

inundación. Dicho proceso se realiza en función del terreno subyacente y no en función del tamaño de celda computacional de la malla generada.

- Solución del esquema numérico basado en multiprocesadores

En HEC-RAS ha sido programado para obtener la solución aprovechando los procesadores que tiene el computador, lo cual permite que se ejecute más rápido que si solo empleara un procesador.

- Permite trabajar con procesadores de 64-Bit y 32-Bit

HEC-RAS puede trabajar ahora en computadores con procesadores de 32 y 64 bit, siendo conocido que un procesador de 64-Bit se ejecutará más rápido que el de 32-Bit y puede manejar gran cantidad de datos.

4.1.2. Metodología

- **Geometría del proyecto**

Para aplicar el modelo es necesario construir el esquema básico o la caracterización geométrica del cauce, la cual se define de una malla bidimensional, líneas de refinamiento y condiciones de frontera.

Se requieren ingresar el componente de rugosidades al modelo, para la totalidad del área de estudio, el cual puede comprender una distribución variada especialmente o bien un valor uniforme para todo el perímetro del área de modelación.

- **Flujo y condiciones de frontera o contorno**

El comportamiento hidráulico del río se determina para la condición de flujo permanente, simulando un régimen de flujo mixto dado que se presentan variaciones de pendiente a lo largo del tramo a modelar, utilizando la profundidad crítica como frontera o condición de contorno aguas abajo, en la condición aguas arriba se ingresan los hidrogramas de crecientes determinados por el estudio hidrológico.

- **Procesos de cálculo del software**

El procedimiento iterativo empleado por el modelo para calcular el perfil hidráulico o de la superficie libre del agua se basa en la solución de la ecuación de la energía en una dimensión a través del Método del Paso Estándar. Las pérdidas de energía se evalúan por fricción (Manning) y contracción /expansión. En el caso de considerar cambios abruptos

que generalmente están causados por estructuras, es recomendable usar el algoritmo de Full Mometum, mientras que para condiciones naturales es preciso emplear el modelo de Onda Difusiva, la cual está basada en las ecuaciones de conservación de Mometum.

Las ecuaciones que considera el modelo para el cálculo de modelos bidimensionales (los cuales suelen emplearse en estudios para el análisis de inundaciones), asume el flujo como un fluido no compresible bajo el principio de conservación de masas (ecuación de continuidad), según el manual (US Army Corps of Engineers, 2016).

Se debe realizar la validación de estabilidad numérica a través de valores de Courant, garantizando que no sean superiores a lo sugerido por el manual del programa (US Army Corps of Engineers, 2016), en aras de garantizar la estabilidad del modelo hidráulico. La ecuación de Courant está dada por la expresión siguiente:

$$C = \frac{V_w \Delta T}{\Delta X} \text{ (Ecuación 23)}$$

Donde:

C	Número de Courant
V _w	Velocidad de la onda (m/s)
ΔT	Tiempo computacional (s)
ΔX	Tamaño medio de la malla

El manual (US Army Corps of Engineers, 2016) sugiere un adopta un valor máximo de C = 5.0 para onda difusiva con lo cual se obtiene resultados que garanticen la estabilidad numérica del modelo.

4.1.3. Clasificación de la cobertura

La resistencia al flujo en un río o rugosidad se debe principalmente a dos factores:

- La rugosidad del grano, que se genera por las fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de las partículas.
- La rugosidad de forma, que se genera por las fuerzas de presión que actúan sobre las formas del fondo.

Para el cálculo de los coeficientes de rugosidad de Manning existen diversas metodologías desarrolladas. Debido a que la determinación de este coeficiente de rugosidad *n* tiene una gran dificultad, existen diferentes metodologías para determinar este valor.

Según Ven Te Chow (2004), para lechos con vegetación, se recomienda usar coeficientes de Manning entre 0.020 y 0.035 como se muestra en las siguientes dos imágenes, de la Figura 5.

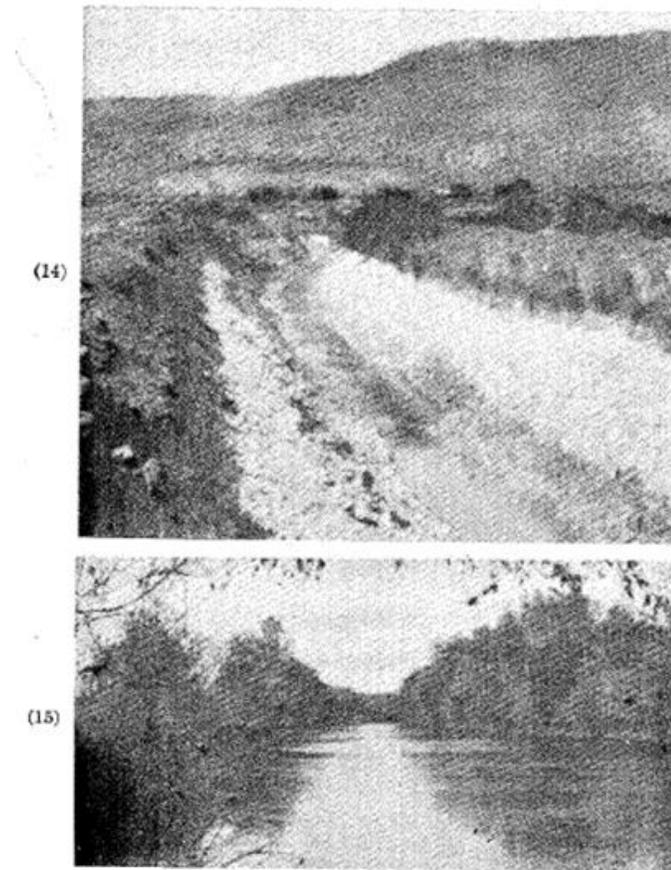


Figura 5-5 (13-15)

Figura 5. Imágenes de referencia de cauces y sus valores de rugosidad n de Manning
Fuente: Hidráulica de canales abiertos (Chow, 2004)

Para la determinación del coeficiente de Manning se adoptó el método de Cowan en el cual el coeficiente de Manning se calcula bajo la sumatoria de diferentes factores que inciden en la rugosidad, los cuales se muestran en Tabla 3. La ecuación de Cowan está determinada por la expresión a continuación, cuyas variables se encuentran descritas y con los valores asignados, en la tabla antes mencionada:

Ecuación de Cowan: $n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$ (Ecuación 24)

Tabla 3. Cálculo de la rugosidad n de Manning en el cauce principal

Condiciones del canal	Valores		Manning en cauce
Tierra	n_0	0,020	0,024

Condiciones del canal		Valores		Manning en cauce
Material involucrado	Corte en roca		0,025	
	Grava fina		0,024	
	Grava gruesa		0,028	
Grado de irregularidad	Suave		0,000	
	Menor	n ₁	0,005	0,005
	Moderado		0,010	
	Severo		0,020	
Gradual	0,000			
Variaciones de la sección transversal	Ocasionalmente alternante	n ₂	0,005	0,004
	Frecuentemente alternante		0,010 - 0,015	
	Insignificante		0,000	
Efecto relativo de las obstrucciones	Menor	n ₃	0,010 - 0,015	0,010
	Apreciable		0,020 - 0,030	
	Severo		0,040- 0,060	
	Baja		0,005 - 0,010	
Vegetación	Media	n ₄	0,010 - 0,025	0,002
	Alta		0,025 - 0,050	
	Muy alta		0,050 - 0,100	
	Menor		1,000	
Grado de los efectos por meandros	Apreciable	m ₅	1,150	1,000
	Severo		1,300	
			n=	

Fuente: (Chow, 2004)

Con base a los valores propuestos por en hidráulica de canales (Chow, 2004), se adoptan los siguientes valores de rugosidad de Manning para cada clase:

Tabla 4. Valores de Manning adoptados

Clase	Descripción	n de Manning
1	Llanura	0,080
2	Río	0,045
3	Vías	0,016
4	Urbano	0,015

Fuente: elaboración propia

Se ingresan las capas que contienen la clasificación y se determinan los respectivos valores de rugosidad para cada clase, se especifica un tamaño de celda de 0,50 m para la creación de la capa de rugosidades que contiene el programa. En la Figura 6 se presenta la distribución espacial de las rugosidades, que se ingresan en el modelo de HEC-RAS, para el estudio hidráulico, con la respectiva asignación de los valores de la tabla anterior.



Figura 6. Distribución en planta de las rugosidades n de Manning

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Configuración del modelo (geometría)

El análisis bidimensional depende de una malla, que como el nombre del modelo lo indica, considera dos dimensiones, y la información del modelo de elevación digital. En la Figura 8

se presenta el modelo de elevación digital, con la malla respectiva malla estructurada empelada para el modelo 2D en el programa HEC-RAS en su versión 6.2. Para el dominio computacional propuesto, se considera una resolución base de la malla de 3,0 m x 3,0 m, la cual resulta en un total de 20.819 celdas, en la extensión de la malla no estructurada (es decir, no hay restricciones en ninguna dirección para el trazado de las celdas). La configuración y las propiedades de la malla se presentan en la Figura 8.

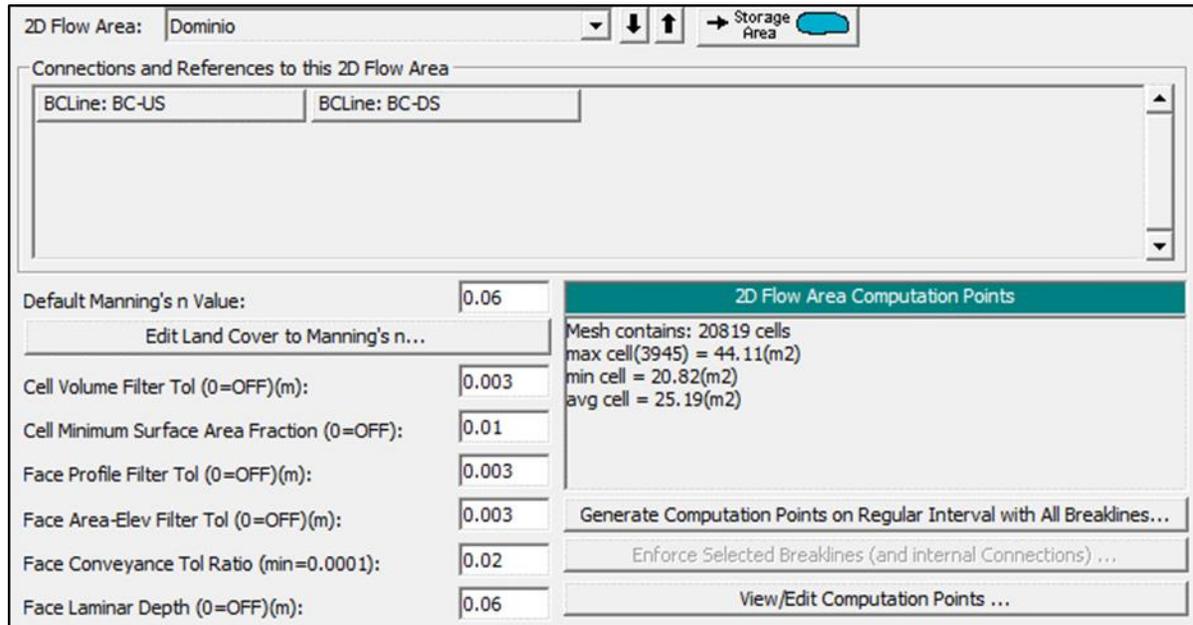


Figura 7. Propiedades de la malla del modelo de HEC-RAS

Fuente: Elaboración propia



Figura 8. Configuración geométrica del modelo HEC-RAS para el análisis de inundaciones

Fuente: Elaboración propia

En el modelo se ingresan 2 puentes existentes, según las elevaciones y configuración geométrica en planta del plano de levantamiento topográfico. Este tipo de estructuras se ingresan al modelo como elementos tipo conexión de clase puentes. En las siguientes figuras se presentan lo ingresado al modelo para los puentes.

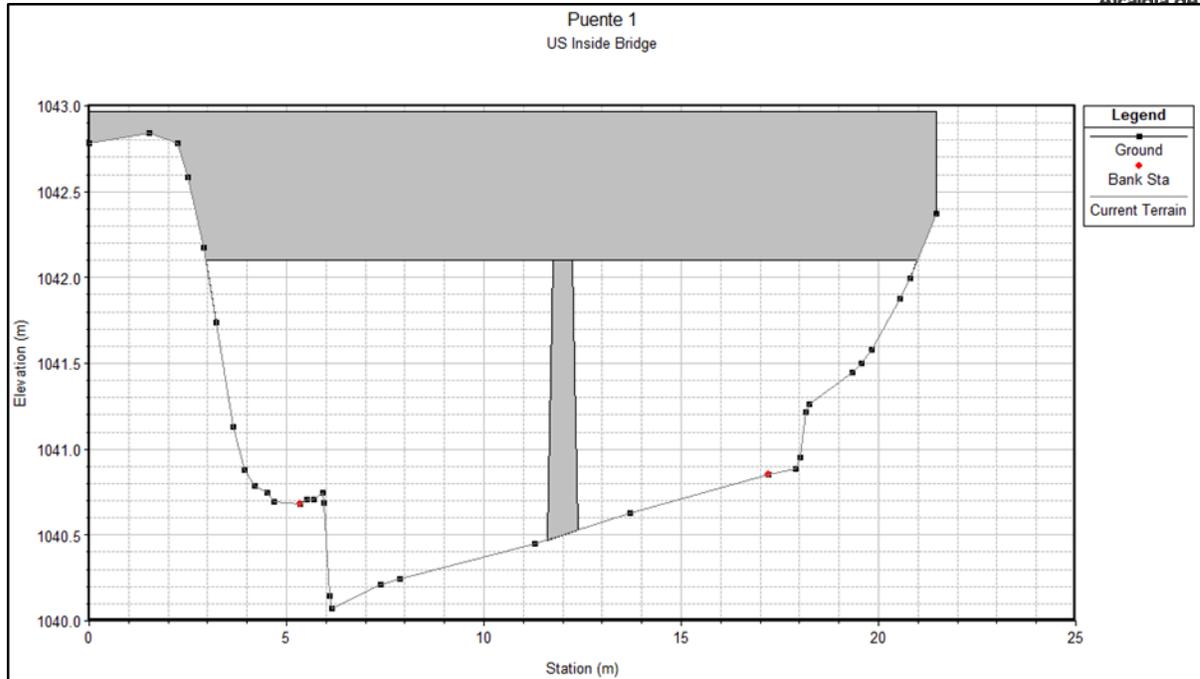


Figura 9. Configuración geométrica del puente 1 vista en sección
Fuente: Elaboración propia

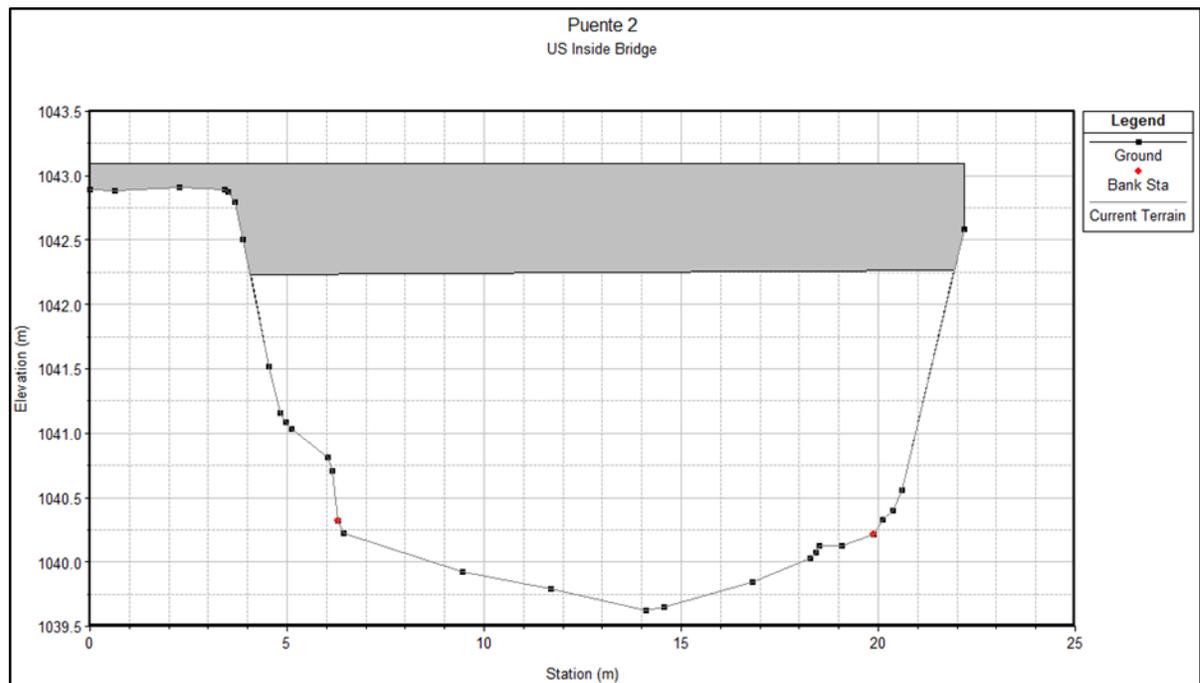


Figura 10. Configuración geométrica del puente 2 vista en sección
Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Condiciones de frontera

La condición de frontera es una configuración definida en el modelo donde se determina el flujo en términos de caudal o niveles (altitud); estos frentes de condición de frontera controlan el flujo de salida como el flujo de entrada según la configuración del mismo.

El modelo cuenta con una condición de frontera de salida, aguas abajo del centro poblado de Aguaclara (BC-DS) y una condición de frontera de entrada aguas arriba del centro poblado (BC-US). Para todos los escenarios de diseño (considerando cada periodo de retorno evaluado, como un escenario), se considera la misma configuración para la condición de frontera aguas abajo, correspondiente al flujo normal para la pendiente de aproximación.

Para la condición de frontera aguas arriba (BC-US), se ingresan los hidrogramas correspondientes del estudio hidrológico, para el río Aguaclara, para cada uno de los periodos de retorno estudiados.

Los hidrogramas de crecientes ingresados al modelo son los correspondientes al estudio de hidrología desarrollado específicamente en el marco del presente estudio; los hidrogramas asociados a los periodos de retorno estudiados para el análisis de inundaciones se presentan en la figura a continuación, correspondiente este, al elemento Junction RAC-2 del modelo hidrológico.

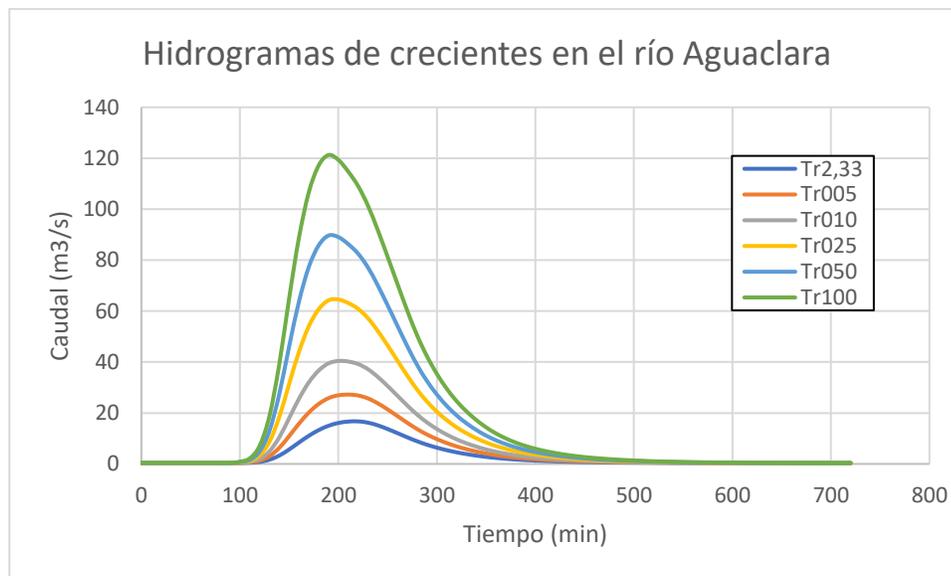


Figura 11. Hidrogramas de crecientes ingresados al modelo

Fuente: Elaboración propia

Para la condición de frontera aguas arriba (BC-US), se ingresan los hidrogramas correspondientes del estudio hidrológico, para el río Aguaclara, para cada uno de los periodos de retorno estudiados.

4.1.6. Resultados

A partir de la configuración geométrica del modelo antes presentado y los caudales determinados en el estudio hidrológico, se corre el modelo, considerando tiempos de cómputo variables, que garanticen un valor de Courant inferior a 5 (lo que garantiza que el resultado obtenido considere estabilidad numérica, empleando la ecuación de onda difusiva, la cual es aplicable para las condiciones específicas de la modelación).

Se generan los modelos para los 11 periodos de retorno, los cuales se presentan con los respectivos anexos, sin embargo, es preciso aclarar que solamente se realizará el análisis específico de los resultados para los 6 periodos de retorno (2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno), que serán empleados posteriormente para la zonificación de la amenaza por inundación.

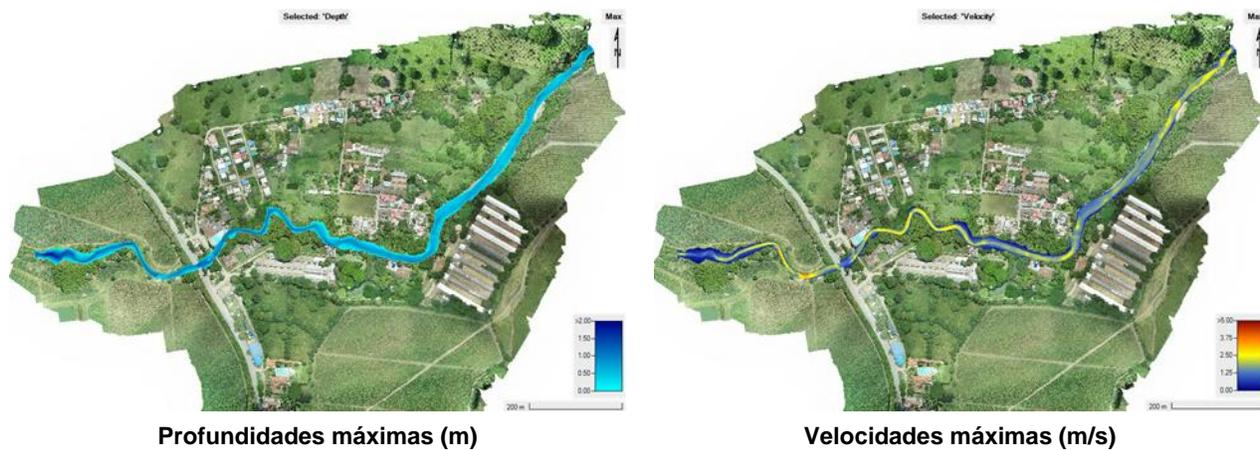


Figura 12. Resultados profundidades y velocidades (Tr2,33 años)

Fuente: Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 2,33 años (ver Figura 12), se observa que la lámina de agua se mantiene dentro del cauce, no hay ningún tipo de desbordamiento (lo cual es esperable para periodos de retorno bajos en este tipo de cauces). Las profundidades de flujo oscilan principalmente entre 0,60 y 0,80 m en el centro del cauce, salvo en el último tramo de la modelación donde se alcanzan profundidades del orden de los 2,00 m. Ahora bien, con respecto a las velocidades de flujo, estas tienden a ser inferiores a los 3,00 m/s en la gran mayoría del tramo de estudio, aunque en el primer tramo, se presentan velocidades levemente superiores (por tratarse del tramo que presenta las pendientes más altas). Las máximas velocidades se encuentran en la curva aguas abajo del puente vehicular.

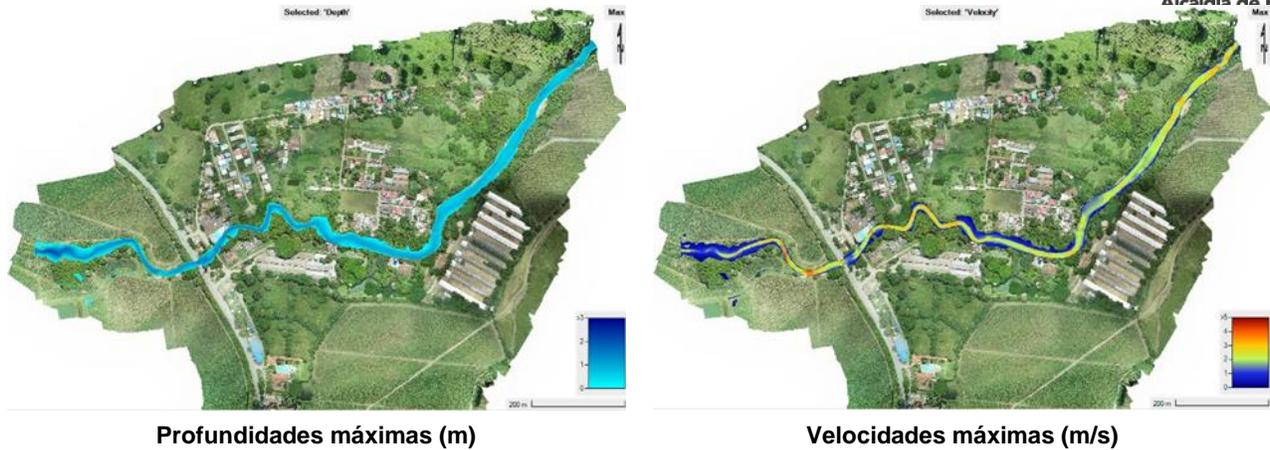


Figura 13. Resultados profundidades y velocidades (Tr005 años)

Fuente: Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 5 años (ver Figura 13), se observa que la lámina de agua se mantiene dentro del cauce, no hay ningún tipo de desbordamiento (lo cual es esperable para periodos de retorno bajos en este tipo de cauces); en este escenario la mancha de inundación es más extensa que para 2,33 años. Las profundidades de flujo oscilan principalmente entre 1,00 y 1,60 m en el centro del cauce, salvo en el último tramo de la modelación donde se alcanzan profundidades del orden de los 2,40 m. Ahora bien, con respecto a las velocidades de flujo, estas tienden a ser inferiores a los 4,00 m/s en la gran mayoría del tramo de estudio, aunque en el primer tramo, se presentan velocidades levemente superiores en promedio. Las máximas velocidades se encuentran en la curva aguas abajo del puente vehicular, justo en la curva opuesta a la captación de aguas superficiales, con velocidades de hasta 4,50 m/s.

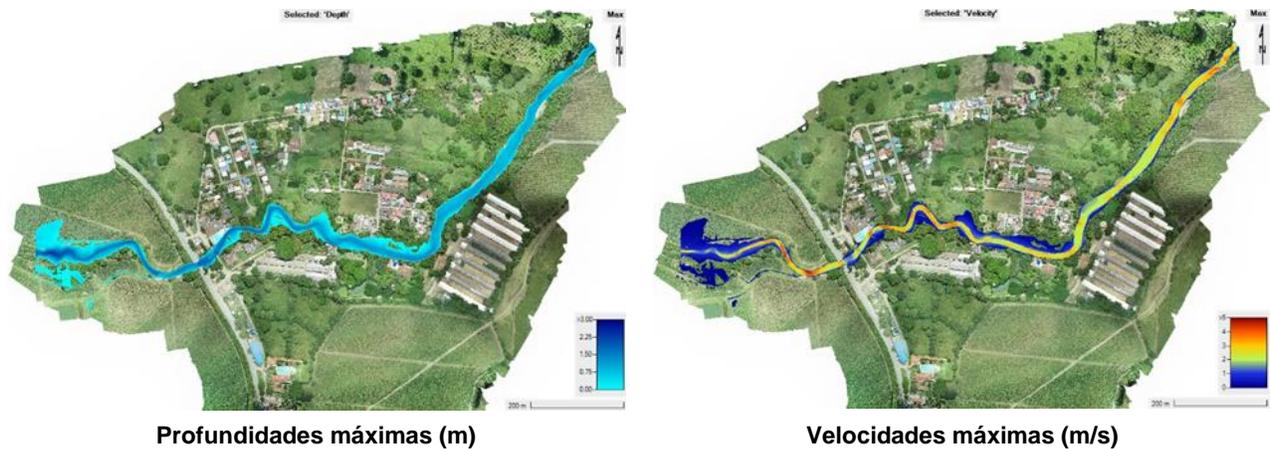


Figura 14. Resultados profundidades y velocidades (Tr010 años)

Fuente: Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 10 años (ver Figura 14), se observa que comienzan a presentarse algunos desbordamientos hacia la zona verdes, en el tramo desde el inicio de la modelación hasta el puente vehicular. Aguas abajo de este tramo, se observa que se

presentan desbordamientos al finalizar la modelación, en efecto, se trata de la zona donde se reducen las pendientes del fondo. Las profundidades de flujo oscilan principalmente entre 1,20 y 1,80 m en el centro del cauce, salvo en el último tramo de la modelación donde se alcanzan profundidades del orden de los 2,50 m. Ahora bien, con respecto a las velocidades de flujo, estas tienden a ser inferiores a los 4,00 m/s en la gran mayoría del tramo de estudio. Se observa incremento de velocidades, en el tramo sinuoso que se encuentra aproximadamente 380 m aguas arriba del puente vehicular hasta el puente.

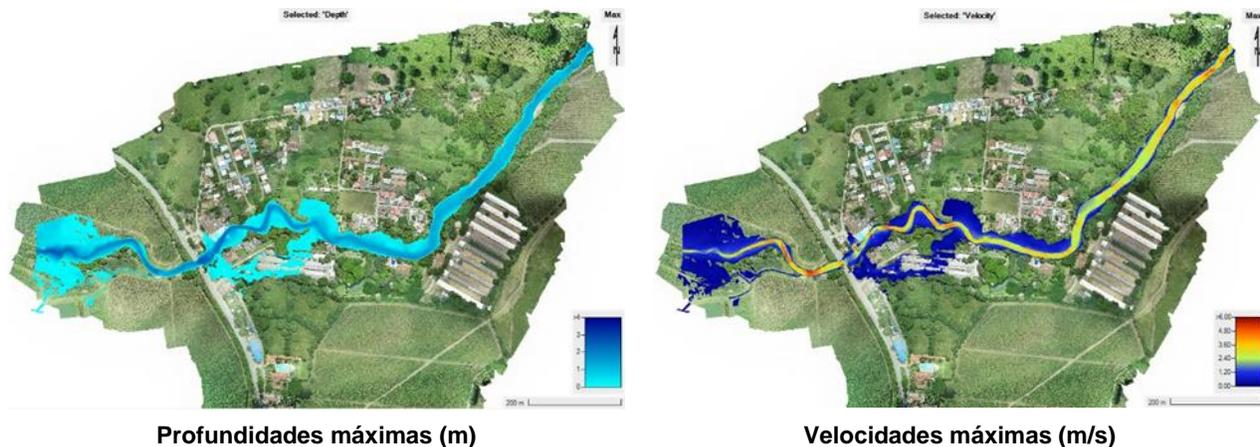


Figura 15. Resultados profundidades y velocidades (Tr025 años)

Fuente: Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 25 años (ver Figura 15), se presentan algunos desbordamientos, especialmente en el tramo final de la modelación, aguas abajo del puente; además de presentarse desbordamientos sobre la margen izquierda, con profundidades máximas de lámina desbordada de hasta 10 cm, afectando algunas construcciones. Sobre la margen derecha, se presentan 2 zonas con desbordamientos, la primera afecta un espacio verde, mientras que la segunda si afecta la vía del primer puente y algunas construcciones. El desbordamiento en este caso, puede deberse a falta de capacidad hidráulica en el puente, lo que genera un remanso y represamiento de las aguas. En promedio se presentan profundidades de flujo de 1,70 m en el centro del cauce, aunque específicamente en el sector de los puentes, las profundidades son del orden de 2,50 m. Respecto a las velocidades de flujo, son en promedio inferiores a los 4,50 m/s, y se observa que en la zona alta (los primeros 500 m de la modelación) se presentan valores distribuidos a lo largo y ancho, mientras que aguas abajo de este tramo, las velocidades tienden a ser más concentradas en el centro del cauce. Las máximas velocidades, nuevamente, se presentan en la curva donde se encuentra la captación, aguas abajo del puente vehicular, con valores de 5,00 m/s.

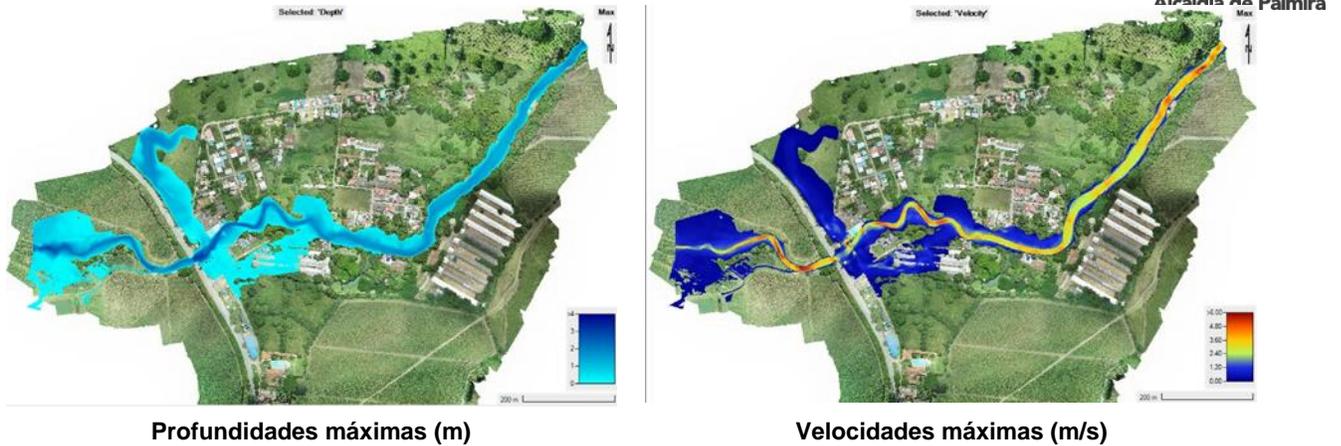


Figura 16. Resultados profundidades y velocidades (Tr050 años)

Fuente: Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 50 años (ver Figura 16), se presentan desbordamientos sobre ambas márgenes del río Aguaclara, el desbordamiento con mayor extensión y profundidad de flujo, se encuentra sobre la margen derecha del río, donde se alcanzan profundidades de flujo en la zona desbordada de hasta 1,70 m. Sobre la margen derecha, la profundidad de lámina de desbordamiento es inferior, alcanzando valores de hasta 0,50 m, que siguen siendo valores a considera como altos. En ambos casos, se observa que se ven afectadas construcciones y principalmente vías vehiculares. En promedio se presentan profundidades de flujo de 1.80 m en el centro del cauce, aunque específicamente en el sector de los puentes, las profundidades son del orden de 2,95 m. Respecto a las velocidades de flujo, son en promedio inferiores a los 6,00 m/s, y se observa que en la zona alta (los primeros 500 m de la modelación) se presentan valores distribuidos a lo largo y ancho, mientras que aguas abajo de este tramo, las velocidades tienden a ser más concentradas en el centro del cauce. Las máximas velocidades, nuevamente, se presentan en la curva donde se encuentra la captación, aguas abajo del puente vehicular, con valores de 6,10 m/s.

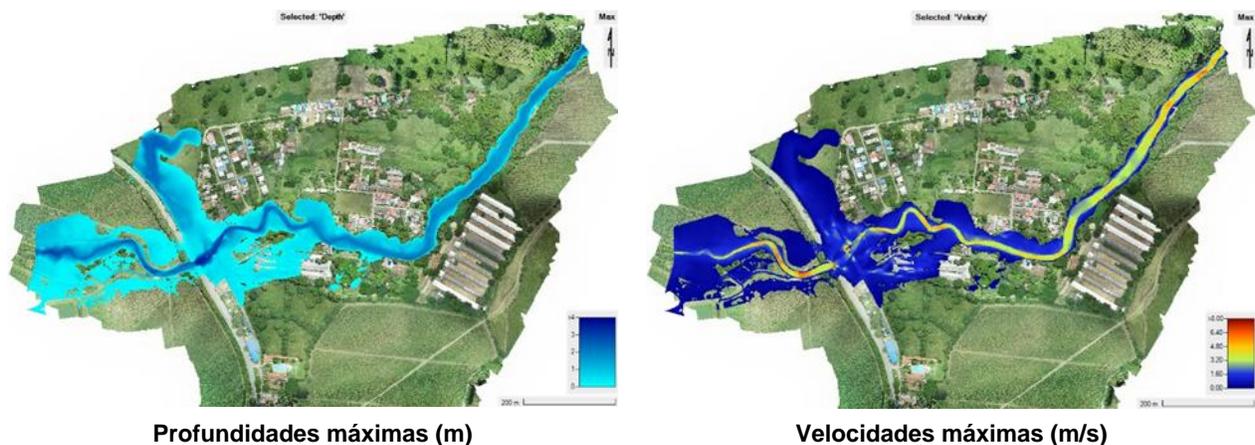
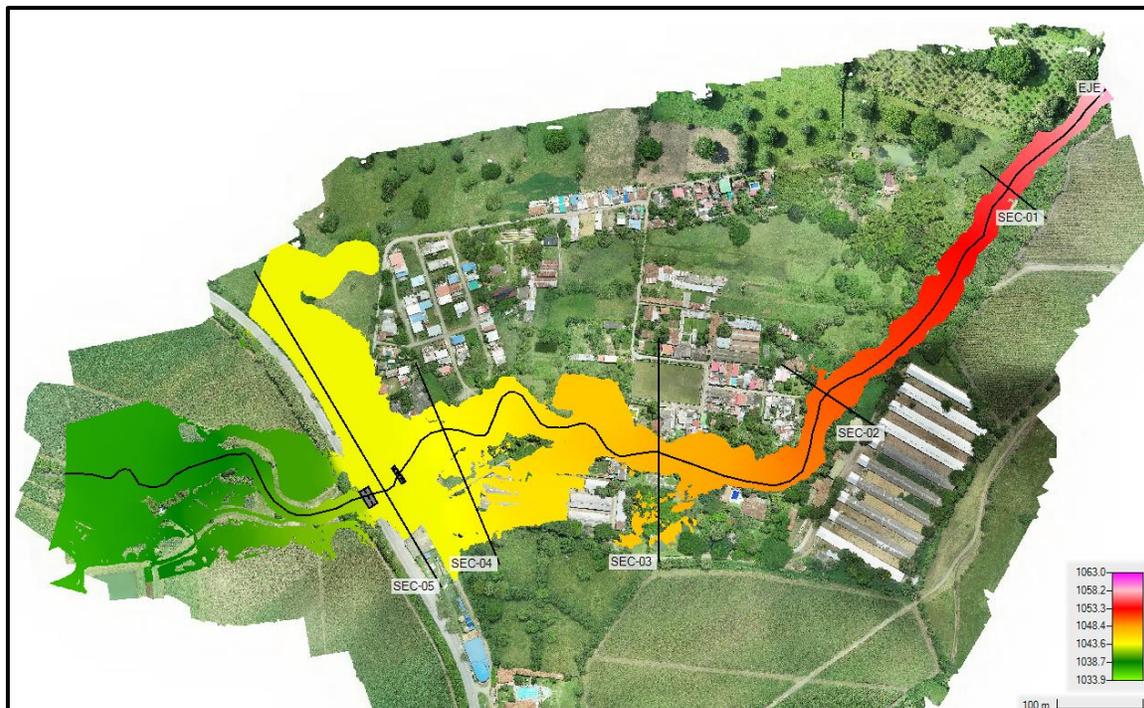


Figura 17. Resultados profundidades y velocidades (Tr100 años)

Fuente: Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años (ver Figura 17), se presentan desbordamientos sobre ambas márgenes del río Aguaclara, el desbordamiento con mayor extensión y profundidad de flujo (al igual que para 50 años de periodo de retorno), se encuentra sobre la margen derecha del río, donde se alcanzan profundidades de flujo en la zona desbordada de hasta 2,30 m. Sobre la margen derecha, la profundidad de lámina de desbordamiento es inferior, alcanzando valores de hasta 0,70 m, que siguen siendo valores a considera como altos. En ambos casos, se observa que se ven afectadas construcciones y principalmente vías vehiculares. Aguas abajo de los puentes se observan desbordamientos sobre ambas márgenes del río. En promedio se presentan profundidades de flujo de 2,00 m en el centro del cauce, aunque específicamente en el sector de los puentes, las profundidades son del orden de 3,50 m, siendo el sector con las profundidades más altas, esto se genera por efecto del remanso que imponen las estructuras de paso, para este caso. Respecto a las velocidades de flujo, son en promedio inferiores a los 6,00 m/s, y se observa que en la zona alta (los primeros 500 m de la modelación) se presentan valores distribuidos a lo largo y ancho, mientras que aguas abajo de este tramo, las velocidades tienden a ser más concentradas en el centro del cauce. Las máximas velocidades, nuevamente, se presentan en la curva donde se encuentra la captación, aguas abajo del puente vehicular, con valores de 6.40 m/s. En las zonas donde se presentan los mayores desbordamientos es donde las velocidades de flujo se reducen, sin embargo, se mantienen altas velocidades en el tramo inicial, como es el caso para periodos de retorno inferiores.



Elevaciones de lámina máximas (Tr100)

Figura 18. Localización de las secciones y perfil del río

En la Figura 18 se presenta la localización en planta del eje del río y las secciones transversales extraídas del modelo, para su respectivo análisis. Se extraen los resultados de elevación de lámina de agua para el perfil del río en primer lugar y se presenta su resultado en la figura siguiente.

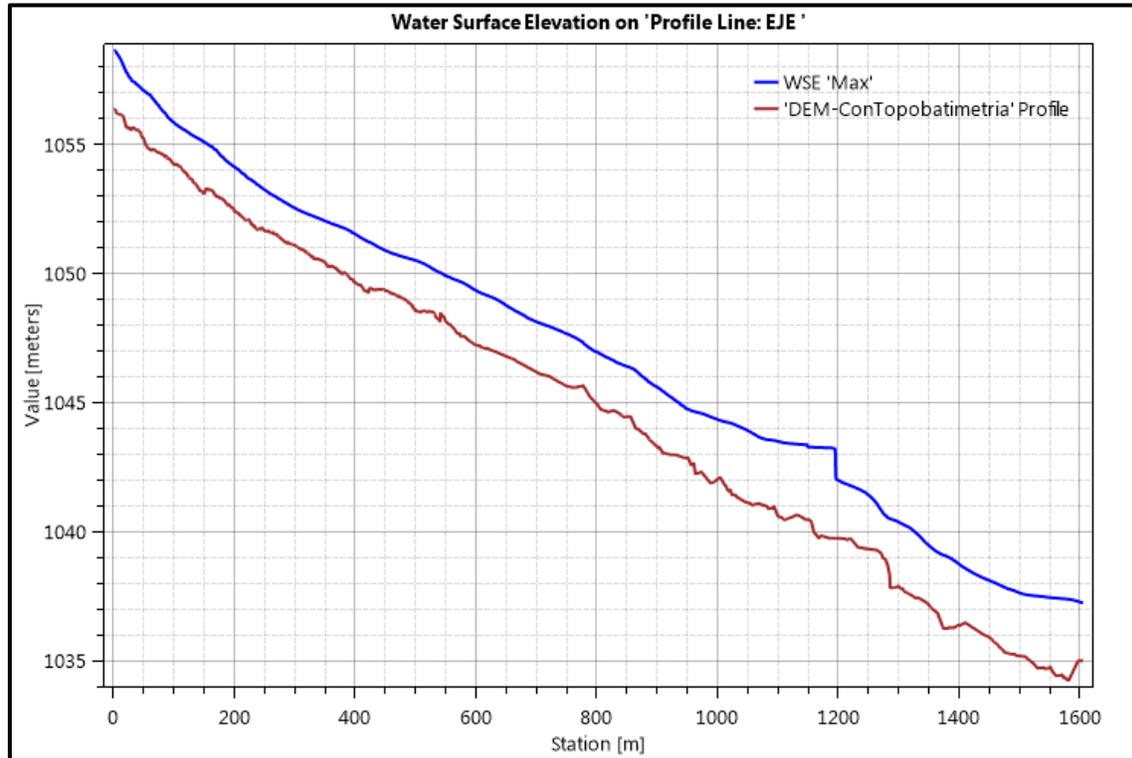


Figura 19. Perfil de lámina de agua (Tr100)

En el perfil de lámina de agua se observa que los niveles tienden a presentar algunas variaciones locales menores a lo largo del cauce, lo que sugiere un comportamiento de lámina libre sin represamientos, salvo específicamente cerca de la abscisa 1200 donde se encuentra ubicado el primer puente; aquí se genera un perfil de remanso de 120 m de longitud, con un nivel de cota de inicio del remanso en la 1043.24 msnm, justo aguas arriba del puente. El nivel de gálibo se encuentra en la cota 1042.10 msnm, es decir que para 100 años de periodo de retorno no se cuenta con suficiente capacidad hidráulica en el primer puente en el sentido del flujo, el nivel de lámina pasa incluso sobre este. El primer puente condiciona los caudales que llegan al segundo (en sentido del flujo).

Ahora se presentan secciones transversales, con los niveles de lámina de agua, para 100, 50, 25 y 10 años de periodo de retorno, cada nivel de lámina indicado en cada sección. En las figuras siguientes se encuentran las 5 secciones correspondientes a la localización en planta de la Figura 18, para las cuales se observa que no se presentan desbordamientos para las secciones aguas arriba, antes de donde inician las construcciones aledañas al río

Aguaclara, es decir para las secciones 1 y 2. En la tercera sección (SEC-03) se observa que el nivel de la lámina de agua se encuentra casi en una condición de banca llena, es decir a punto de superar el nivel máximo del terreno en las orillas y generar un desbordamiento de las aguas. Finalmente, en las secciones 4 y 5 se observa claramente un desbordamiento de la lámina de agua, especialmente en la sección 5 se observa que la lámina se extiende en su mayoría sobre la margen derecha, con profundidades de lámina que alcanzan hasta 2.0 de profundidad. En ese sentido, para mitigar estos fenómenos es posible considerar modificar la configuración geométrica del puente incluyendo la cota de gálibo y la inclusión de diques a ambos lados del río.

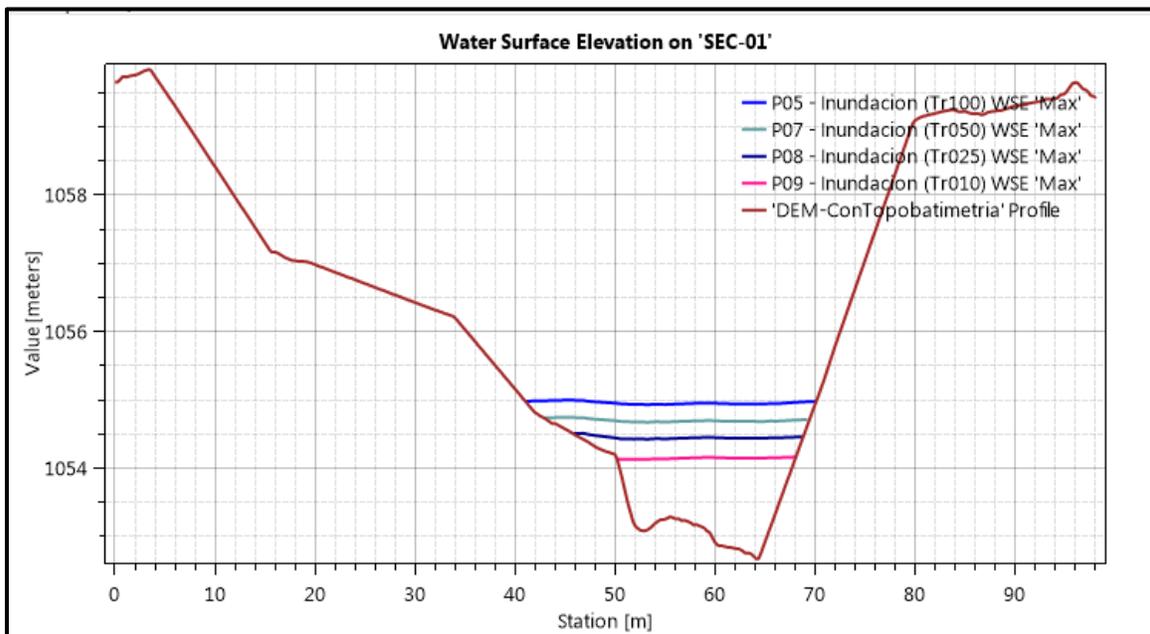


Figura 20. Sección transversal río Aguaclara (SEC-01)

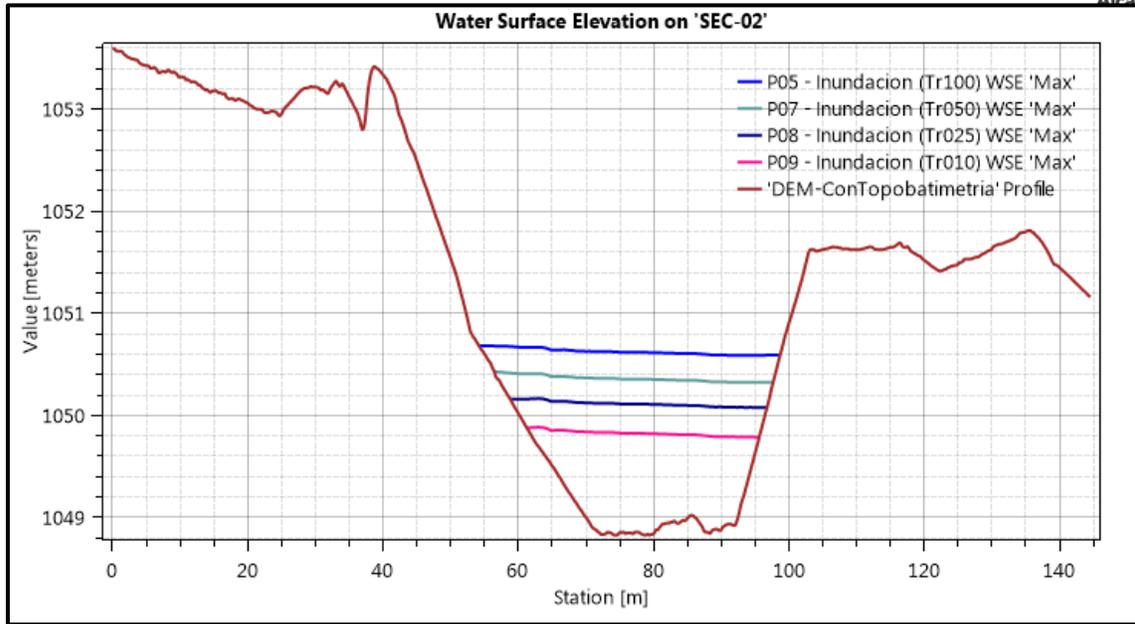


Figura 21. Sección transversal río Aguaclara (SEC-02)

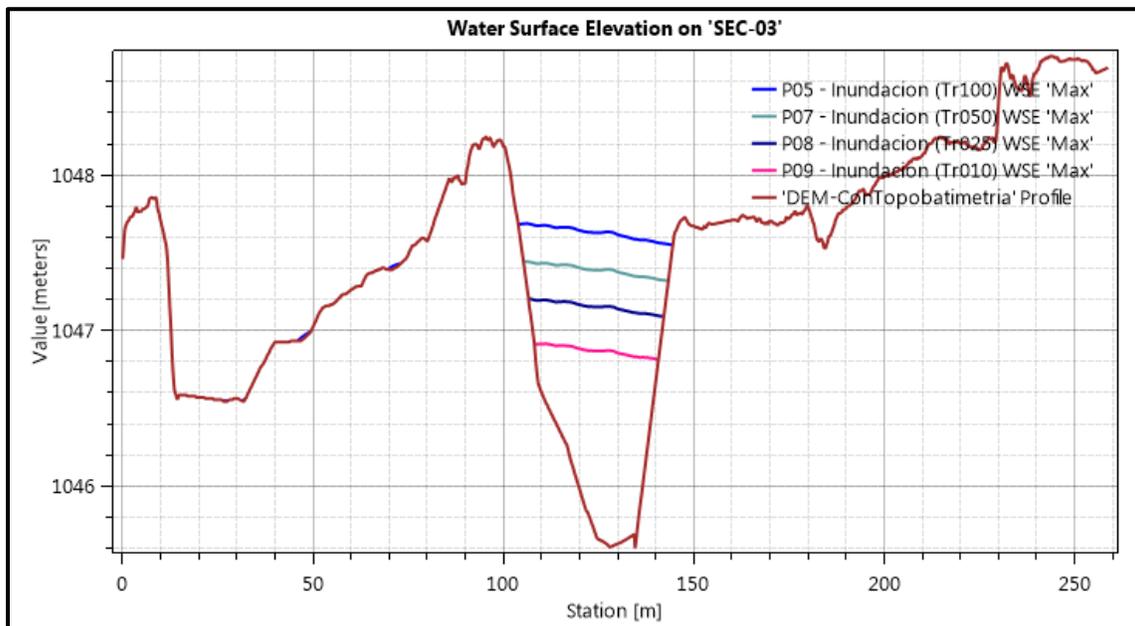


Figura 22. Sección transversal río Aguaclara (SEC -03)

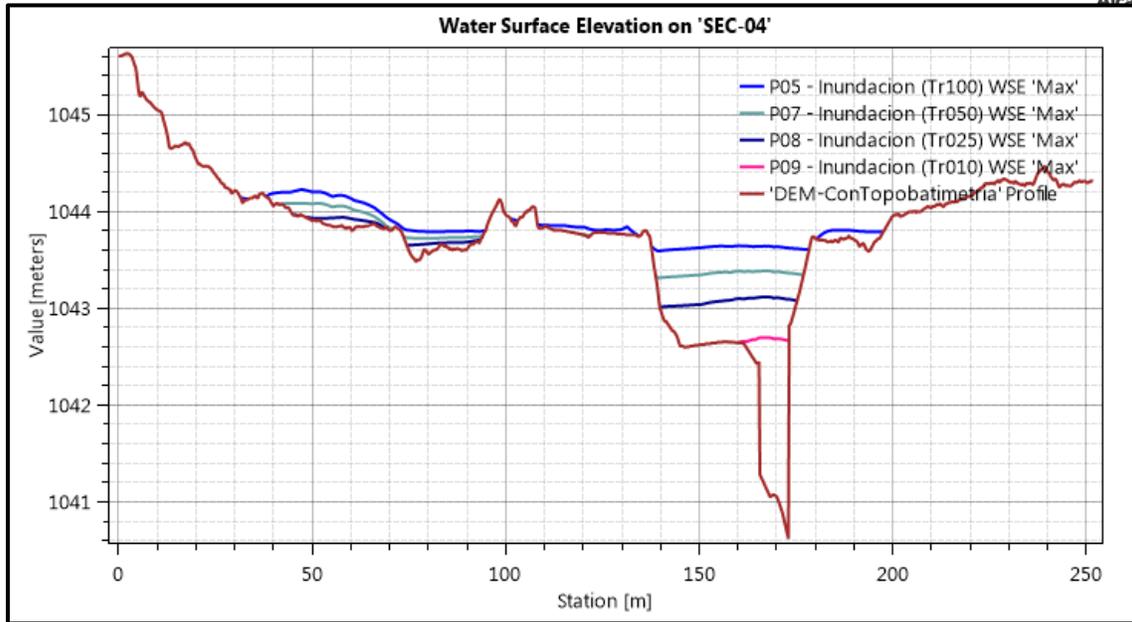


Figura 23. Sección transversal río Aguaclara (SEC 04)

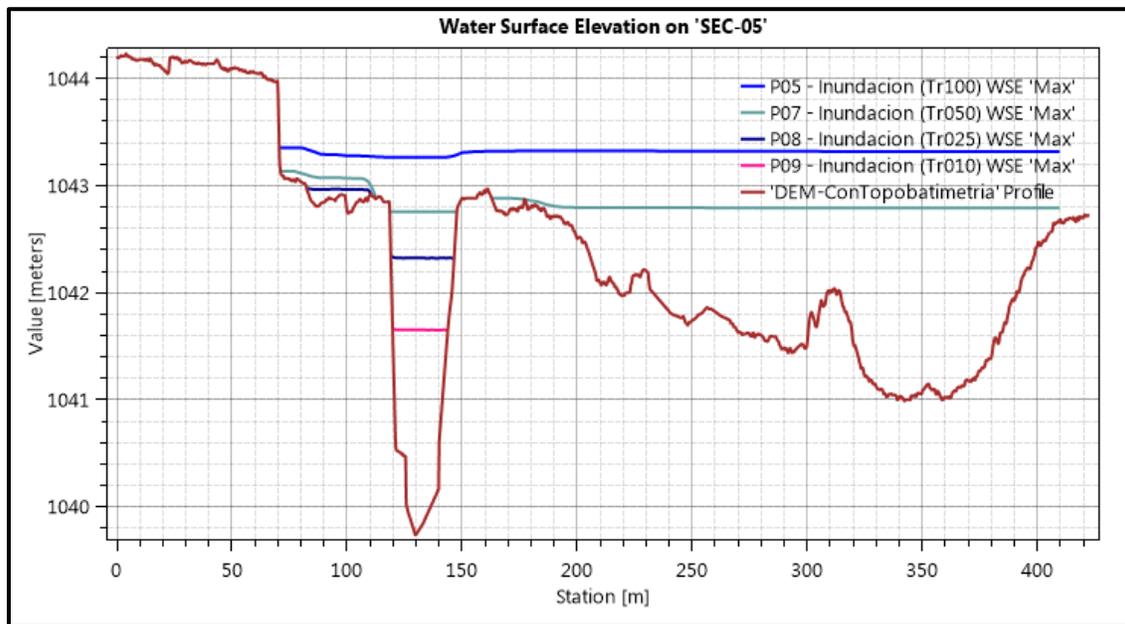


Figura 24. Sección transversal río Aguaclara (SEC 05)

5. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES A ESCALA 1:2.000

La zonificación es la representación cartográfica de áreas con características homogéneas. Debe realizarse bajo el sistema de coordenadas oficial definido por la autoridad cartográfica nacional y su precisión estará dada en función de la escala de trabajo. De acuerdo con lo determinado en el Decreto 1077 de 2015 "para la zonificación de la amenaza se emplean tres categorías: alta, media y baja, teniendo en cuenta el registro de eventos, la recurrencia de los mismos y la intensidad (niveles alcanzados) de la inundación".

5.1. Consideraciones generales conceptuales sobre las inundaciones

Las inundaciones constituyen eventos recurrentes en los ríos y se presentan como consecuencia de lluvias fuertes y continuas que superan la capacidad de transporte de los ríos y de absorción del suelo. Debido a esto el nivel del agua supera el nivel de banca llena del cauce principal del río y se produce la inundación de las planicies y tierras adyacentes. Estos eventos ocurren de forma aleatoria en función de los procesos climáticos locales y regionales.

Las inundaciones pueden ocurrir debido al comportamiento natural de los ríos o a alteraciones producidas por el hombre. Las condiciones naturales corresponden a las características climáticas y físicas propiciadas por la cuenca en su estado natural, como son: el relieve, el tipo de precipitación, la cobertura vegetal y la capacidad de drenaje. Entre las alteraciones provocadas por la acción del hombre se tienen: la impermeabilización de los suelos al urbanizarlos, la deforestación, la alteración de los cursos y la canalización de los ríos, la construcción de obras hidráulicas, etc.

Una cuenca en estado natural posee mayor interceptación vegetal, mayores áreas permeables, menor escurrimiento superficial y un drenaje más lento en relación con las características que presenta una vez es intervenida. Por esta razón las inundaciones se producen con menor frecuencia en una cuenca no intervenida.

Los problemas resultantes de los desbordamientos de las corrientes de agua dependen del grado de ocupación de la planicie de inundación y de la frecuencia con la cual ocurren las inundaciones. La población de mayor poder adquisitivo tiende a habitar las localidades seguras, mientras que la población más pobre tiende a ocupar las áreas de alta amenaza de inundación, provocando problemas sociales que se repiten durante cada creciente. Cuando la frecuencia de las inundaciones es baja la población subvalora la amenaza y ocupa las zonas inundables. Esta situación genera consecuencias catastróficas cuando se presentan nuevos desbordamientos. No obstante, la predicción de las inundaciones y sus

efectos es una tarea bastante compleja, por cuanto el pronóstico del comportamiento hidrológico de largo plazo es difícil, debido, a la aleatoriedad de los fenómenos meteorológicos y al gran número de parámetros y variables involucradas en los procesos hidrológicos (lluvia – escorrentía).

Normalmente las inundaciones suelen ser descritas en términos de su periodo de retorno, el cual corresponde al intervalo promedio de recurrencia entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. Una inundación con un periodo de retorno de 100 años se refiere a un evento que presenta una probabilidad de ocurrencia del 1% en cualquier año, o también al evento que se presenta cada 100 años, en promedio. Estos periodos de retorno se determinan a partir de la información histórica existente, que en muchos casos corresponde a periodos demasiado cortos, por lo cual la estimación realizada tiene asociada una incertidumbre.

La variación del nivel del agua en una creciente de un río depende de las características climáticas y físicas de la cuenca hidrográfica y su predicción puede ser realizada a corto o largo plazo. La previsión a corto plazo, también llamada en tiempo real, permite establecer el nivel y su tiempo de ocurrencia en una sección de un río con una anticipación que depende de los tiempos de escurrimiento de la cuenca y las distribuciones temporal y espacial de la precipitación. Dado que estas distribuciones sólo pueden ser estimadas en forma confiable con antecendencia de pocos días u horas, la predicción de niveles no puede realizarse con una anticipación muy grande.

La predicción a largo plazo cuantifica la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en términos estadísticos, sin precisar cuándo ocurrirán. La predicción se basa en la estadística de ocurrencia de niveles en el pasado y permite escoger los niveles de crecientes para algunos riesgos escogidos.

5.1.1. Medidas para el control y el manejo de inundaciones

Las medidas para el control y el manejo de las inundaciones pueden ser de tipo estructural y no estructural. Las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial evitando o mitigando los daños generados por las crecientes, en tanto que las medidas no estructurales son aquellas en que la magnitud de los daños se reduce como consecuencia de una mejor convivencia de la población con las crecientes. Las medidas estructurales son todas aquellas obras de ingeniería (diques, presas, canales de desviación, etc.) en las cuales se interviene el sistema fluvial natural afectando sus proceso hidrodinámicos y morfológicos. Estas intervenciones pueden originar efectos adversos en el sistema fluvial que requerirán para su manejo y control la construcción de nuevas obras.

Las medidas estructurales no pueden ser proyectadas para dar una protección total, ya que esto exigiría una protección contra el mayor creciente posible, lo cual física y económicamente no es factible. Es decir, las medidas estructurales no permiten controlar o

evitar por completo las inundaciones, solamente tienden a minimizar los impactos originados por éstas. Una medida estructural puede crear una falsa sensación de seguridad, generando una mayor ocupación de áreas inundables, lo cual podría ocasionar daños significativos cuando se presenten inundaciones superiores al evento de diseño.

En consecuencia, el control y el manejo más eficaz de las inundaciones se obtiene al establecer estrategias que combinen las medidas estructurales y no estructurales, permitiendo a la población minimizar las pérdidas y lograr una convivencia armónica con el río. Es decir, las medidas no estructurales complementan con gran efectividad las actuaciones estructurales por encima de su umbral de protección.

El costo de protección de un área inundable a través de medidas estructurales, en general, es superior al de las medidas no estructurales. Por esta razón, las medidas no estructurales en conjunto con las estructurales pueden disminuir significativamente los daños con un costo menor.

5.1.2. Medidas estructurales

Las medidas estructurales son obras de ingeniería construidas para reducir el riesgo originado por las crecientes. Estas medidas pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que cubren toda la cuenca, procurando modificar la relación entre precipitación y caudal, como, por ejemplo, un cambio en la cobertura vegetal del suelo, la cual reduce y retarda los picos de las crecientes y controla la erosión de la cuenca.

Las medidas intensivas son aquellas que se enfocan en el río y pueden ser de tres tipos: (i) obras que aceleran el escurrimiento como son la construcción de diques, el aumento de la capacidad de descarga de los ríos y el corte de meandros; (ii) obras que regulan la creciente, como, por ejemplo, las presas; y (iii) obras que desvían parte del caudal, como son los canales de desvíos. En la Tabla 5 se presentan las principales características de las medidas estructurales.

Tabla 5. Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones

	MEDIDAS	VENTAJA	DESVENTAJA	APLICACIÓN
Extensivas	Cambio de la cobertura vegetal	Reducción pico de la creciente	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
	Control de pérdidas	Reducción del escurrimiento	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
Intensivas	Construcción de diques	Alto grado de protección	Generación de grandes daños si fallan	Ríos grandes
	Reducción de la rugosidad por desobstrucción	Aumento en la capacidad	Efecto localizado	Ríos pequeños

MEDIDAS	VENTAJA	DESVENTAJA	APLICACIÓN
	drenaje con poca inversión		
Corte de meandros	Aceleración del escurrimiento	Impacto negativo en ríos aluviales	Áreas de inundación estrechas
Construcción de represas	Regulación de la creciente	Difícil localización	Cuencas medianas
Canales de desvío	Reducción del caudal en el canal principal	Dependencia de la topografía	Cuencas medianas y grandes

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales corresponden al conjunto de programas y actividades que permiten tener una mejor convivencia con las crecientes, minimizando las pérdidas que éstas pueden generar en las áreas inundables. Entre las medidas de protección no estructurales se tienen: la definición y protección de las zonas de ronda hídricas, la generación de los mapas de amenaza y de riesgos por inundación, los sistemas de previsión y alertas de inundaciones, los programas de protección civil y los programas de seguros contra crecientes.

5.2. Metodología

La metodología propuesta en el presente estudio para la determinación de los niveles de amenaza por fenómenos de inundación se fundamenta en varios de los criterios utilizados en las metodologías de la literatura y en la experiencia del grupo de investigación de la Universidad del Valle, HIDROMAR en el área de amenazas aplicadas en el río Cauca, teniendo en cuenta los diferentes acuerdos reglamentados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC para protección de las planicies aluviales del río Cauca y sus tributarios (alineamientos de diques riberaños, determinación de la franja protectora del río Cauca y periodos de retorno de diseño de diques para cultivos, infraestructuras y centros poblados). También se consideraron los planes y esquemas de ordenamiento territorial y los planes de prevención y de atención de desastres, emergencias y contingencias de la inundación.

5.2.1. Niveles de frecuencia de los eventos de inundaciones

A cada escenario seleccionado para el fenómeno de inundación se le debe asignar un nivel de frecuencia en términos cualitativos: frecuencia alta, media, moderada, baja, etc.

Los umbrales de periodos de frecuencia o recurrencia recomendados se presentan en la Tabla 6. Los umbrales de los periodos seleccionados corresponden inicialmente a dos

veces el periodo de retorno de los diseños de los drenajes urbanos (10 años). El segundo umbral corresponde aproximadamente a los periodos que los diseños de las obras de infraestructura vial y de cultivos deben garantizar según la normatividad colombiana (30 años). El tercer umbral corresponde a lo previsto en el Acuerdo N° 052 de 2011, que estipula que cualquier comunidad aledaña a un cauce debe tener garantizada su integridad para una creciente con un periodo de retorno de 100 años (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2011).

Tabla 6. Nivel de frecuencia de los eventos de inundaciones

FRECUENCIA	FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN
$Tr \leq 10$ años	Alta
$10 \text{ años} < Tr \leq 30$ años	Media
$30 \text{ años} < Tr \leq 100$ años	Baja

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

5.2.2. Niveles de intensidad o magnitud de los eventos de inundaciones

El estado del arte en los criterios de evaluación de la magnitud del evento está basado en las combinaciones de factores hidrodinámicos y características del terreno sobre el cual actúa el fenómeno. En general, la magnitud e intensidad de la amenaza, originada por el desbordamiento de un río, en una planicie de inundación se ha establecido a partir de cuatro criterios (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

1. Magnitud e intensidad asociada a las profundidades de agua. Se estima que profundidades de agua superiores a cierto valor pueden causar daños importantes. Este criterio es el más utilizado y en algunas ocasiones el único implementado por las entidades encargadas de la administración de los recursos hídricos.
2. Magnitud e intensidad asociada a la velocidad del flujo. Se fundamenta en el peligro que representa para las personas y los vehículos la capacidad de arrastre y erosión de flujos de agua de altas velocidades.
3. Magnitud e intensidad asociada a la combinación de las profundidades de agua y las velocidades. A partir de ciertos valores esta combinación resulta peligrosa e impide que las personas permanezcan de pie o puedan maniobrar a través del flujo. En la actualidad se están desarrollando experimentos tendientes a determinar la profundidad y la velocidad del flujo que generan inestabilidad en las personas.
4. Magnitud e intensidad asociada a la capacidad del flujo para generar erosión y transportar escombros.

Bajo este contexto, las características hidráulicas a tener en cuenta para determinar la intensidad o magnitud son la profundidad (H), la velocidad (V) y el producto de la profundidad por la velocidad $H*V$.

Los umbrales de intensidad o magnitud del evento definido en el presente estudio se muestran en la Tabla 7. El primer umbral determinado corresponde al nivel o profundidad del agua observada a partir de la cual las comunidades desalojan sus viviendas (0,45 m) y el segundo umbral corresponde al criterio en el cual se considera que la vida de una persona está en riesgo (0,90 m). En lo que respecta a la velocidad del flujo, los umbrales corresponden a 0,5 m/s y 0,8 m/s, respectivamente. Los umbrales del producto de la profundidad por la velocidad corresponden a 0,225 m^2/s y 0,45 m^2/s (ver Figura 25). Los umbrales definitivos de intensidad o magnitud del evento se toman de acuerdo con el rango de niveles, el rango de velocidades y los rangos del producto de la profundidad por la velocidad.

Tabla 7. Nivel de intensidad o magnitud del evento de inundación

INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN	NIVEL DE INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN
$H \geq 0,9 \text{ m}$ ó $V \geq 0,8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alta
$0,45 \text{ m} \leq H < 0,9 \text{ m}$ ó $0,5 \text{ m/s} \leq V < 0,8 \text{ m/s}$ ó $0,225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0,45 \text{ m}^2/\text{s}$	Media
$0,05 \text{ m} < H < 0,45 \text{ m}$ y $V < 0,5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0,225 \text{ m}^2/\text{s}$	Baja

H= Profundidad; V= Velocidad

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

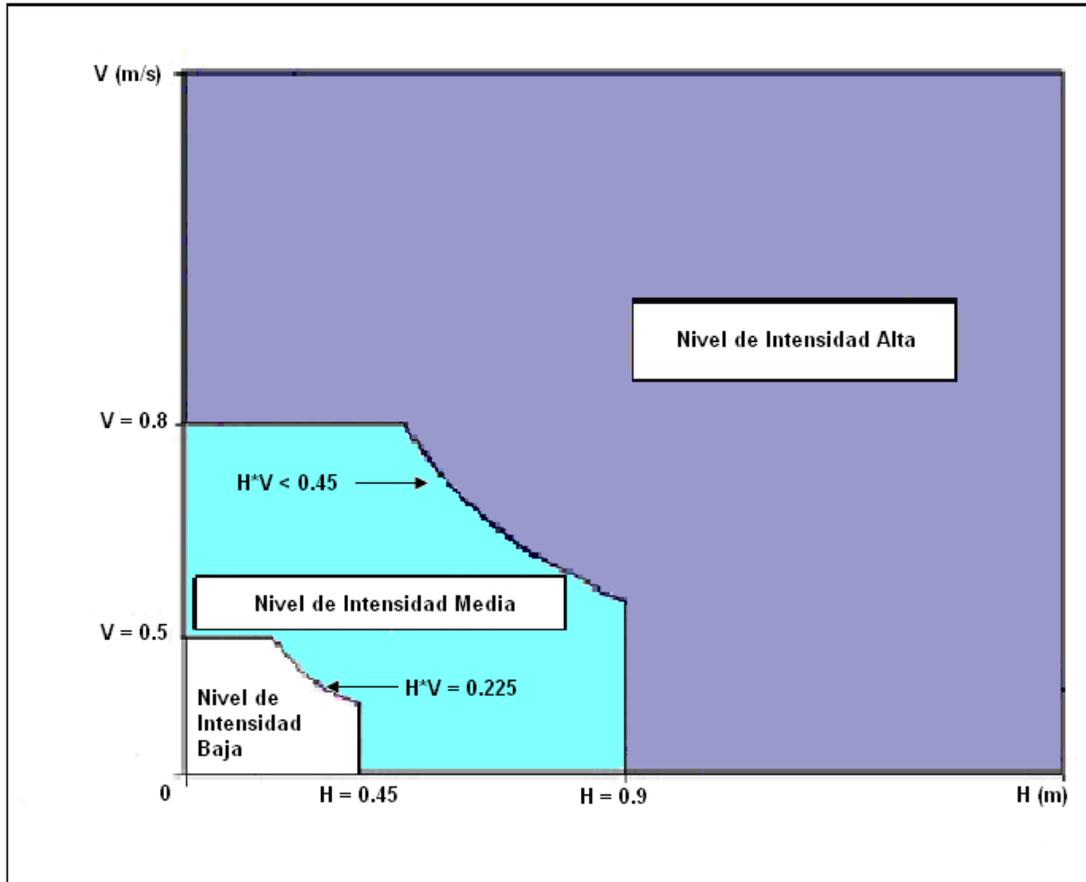


Figura 25. Nivel de intensidad o magnitud de la amenaza por inundaciones.

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

5.2.3. Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones

Después de determinar los umbrales y niveles de frecuencia e intensidad del evento se procede a clasificar los mapas de inundación en diferentes niveles cualitativos de amenaza (alta, significativa, media, moderada alta, moderada, moderada baja, baja, etc.).

Los niveles de amenaza que se recomienda utilizar son alta, media y baja, los cuales dependen de los niveles de frecuencia o recurrencia del evento y de los niveles de intensidad de la amenaza, expresada mediante los tres rangos de profundidades de agua recomendados, como se presenta en la Tabla 8 y en la Tabla 9.

Tabla 8. Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación

NIVEL DE AMENAZA

NIVEL DE INTENSIDAD	Nivel de intensidad alto $H \geq 0,9$ m ó $V \geq 0,8$ m/s ó $H*V \geq 0,45$ m ² /s	Alto	Alto	Alto
	Nivel de intensidad medio $0,45 \leq H < 0,9$ m ó $0,5 \leq V < 0,8$ m/s ó $0,225 \leq H*V < 0,45$ m ² /s	Alto	Medio	Medio
	Nivel de intensidad bajo $0,05 < H < 0,45$ m y $V < 0,5$ m/s y $H*V < 0,225$ m ² /s	Medio	Bajo	Bajo
FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN	Frecuencia alta $Tr \leq 10$	Frecuencia media $10 < Tr \leq 30$	Frecuencia baja $30 < Tr \leq 100$	

H=Altura; V=Velocidad

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

Tabla 9. Clasificación de la amenaza por inundaciones

PROFUNDIDAD (M) Ó VELOCIDAD (M/S) Ó PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD (M ² /S)	NIVEL DE INTENSIDAD DE LA AMENAZA	PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	NIVEL DE FRECUENCIA DE LA AMENAZA	CLASIFICACIÓN DE LA AMENAZA
$H \geq 0,9$ ó $V \geq 0,8$ ó $H*V \geq 0,45$	Alto	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$H \geq 0,9$ ó $V \geq 0,8$ ó $H*V \geq 0,45$	Alto	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Alto
$H \geq 0,9$ ó $V \geq 0,8$ ó $H*V \geq 0,45$	Alto	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Alto
$0,45 \leq H < 0,9$ ó $0,5 \leq V < 0,8$ ó $0,225 \leq H*V < 0,45$	Medio	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$0,45 \leq H < 0,9$ ó $0,5 \leq V < 0,8$ ó $0,225 \leq H*V < 0,45$	Medio	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Medio
$0,45 \leq H < 0,9$ ó $0,5 \leq V < 0,8$ ó $0,225 \leq H*V < 0,45$	Medio	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Medio
$0,05 < H < 0,45$ y $V < 0,5$ y $H*V < 0,225$	Bajo	$Tr \leq 10$	Alto	Medio
$0,05 < H < 0,45$ y $V < 0,5$ y $H*V < 0,225$	Bajo	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Bajo
$0,05 < H < 0,45$ y $V < 0,5$ y $H*V < 0,225$	Bajo	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Bajo

H= Altura; V= Velocidad

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle, 2010)

5.3. Mapas de amenaza por inundación por desbordamiento

Los mapas de amenaza por inundaciones constituyen una medida no estructural para el conocimiento y control de inundaciones. Estos mapas son modelos que permiten la evaluación y predicción de las consecuencias de un evento de precipitaciones extraordinarias; es decir, permiten identificar, clasificar y valorar las áreas potencialmente inundables del territorio.

La condición de amenaza se presenta únicamente cuando ocurre un evento natural en un área ocupada por actividades humanas (elementos expuestos) que deben soportar las consecuencias de dicho evento. Por consiguiente, el riesgo puede dividirse en tres componentes estrechamente interrelacionados: la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición.

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012 la amenaza se define como el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales

La amenaza o peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural con una cierta magnitud, generalmente de carácter sorpresivo y de evolución rápida, que afecta a un componente o a la totalidad del sistema territorial expuesto. En consecuencia, las inundaciones constituyen las amenazas, que son el resultado de la combinación de la tipología, las características de los eventos lluviosos y el conjunto de factores físicos del área afectada. Desde esta perspectiva, la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo es que la primera se refiere a la probabilidad de que se manifieste un evento natural, mientras que el segundo está relacionado con la probabilidad de que se den ciertas consecuencias.

La vulnerabilidad se refiere a la predisposición o susceptibilidad de los componentes antrópicos del sistema territorial para ser dañados total (destrucción) o parcialmente (deterioro) debido al impacto de la amenaza. Representa la medida de probabilidad de daño o pérdida de un componente o sistema territorial expuesto a la acción de la amenaza. La vulnerabilidad depende de dos condiciones: la ubicación del componente respecto a la zona de impacto de la amenaza (exposición) y las características y el estado de conservación del mismo. Por tanto, la vulnerabilidad es esencialmente una condición humana.

La exposición o elementos en riesgos se refieren a la distribución espacial de la población, actividades económicas, bienes materiales, obras de ingeniería, etc., sobre las que puede impactar la amenaza. En consecuencia, el riesgo de las inundaciones depende de la ocurrencia y magnitud de la amenaza natural y de la vulnerabilidad de un elemento o sistema territorial expuesto a ella.

Un desastre natural constituye la ocurrencia efectiva y real del riesgo que, debido a la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa efectos negativos sobre los mismos. En el caso de las inundaciones, la manifestación del desastre se presenta cuando el impacto de los desbordamientos supera los mecanismos de defensa adoptados por la sociedad, generando perjuicios económicos, sociales, físicos, etc. Así, para que un evento de desbordamiento se convierta en desastre es necesario que sus consecuencias tengan un

impacto en una estructura humana vulnerable. Por esta razón, no todos los eventos de precipitaciones fuertes o constantes pueden ser considerados como amenazas, por cuanto su peligrosidad depende del grado de vulnerabilidad de los elementos expuestos al riesgo.

Para la evaluación del riesgo de inundaciones es necesario determinar, en primer término, los mapas de amenazas (mapa de inundación) y de vulnerabilidad, para posteriormente integrarlos, obteniendo el mapa de riesgos.

En primer lugar, se realiza la zonificación de la amenaza para cada uno de los periodos de retorno considerados (2,33, 10, 25, 50 y 100 años), para posteriormente determinar la envolvente de máxima clasificación según los mapas generados. En ese orden de ideas, siguiendo la clasificación de la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos para cada periodo de retorno.

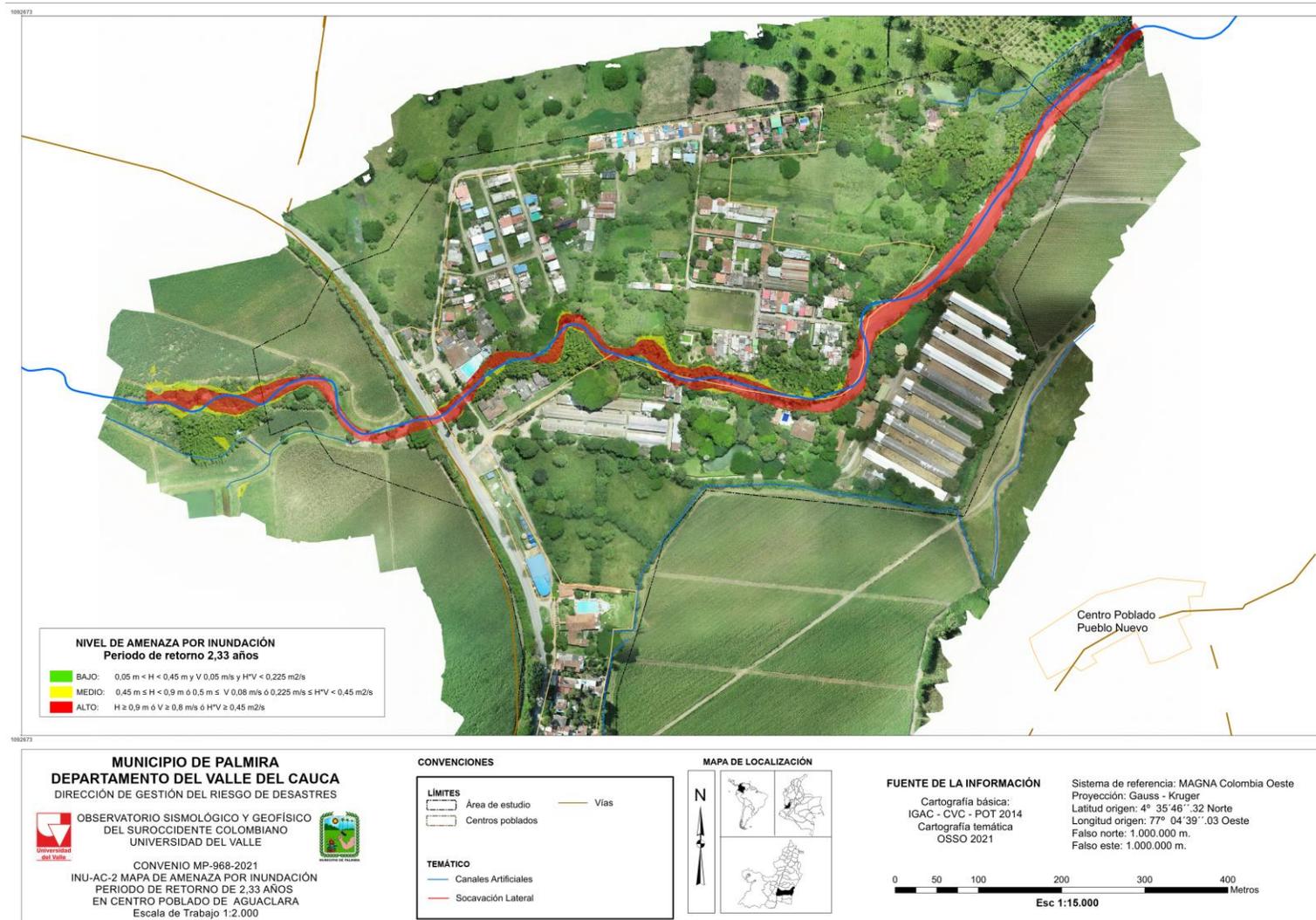


Figura 26. (INU-AC-2) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara- Periodo de retorno de 2,33 años
Fuente: Elaboración propia

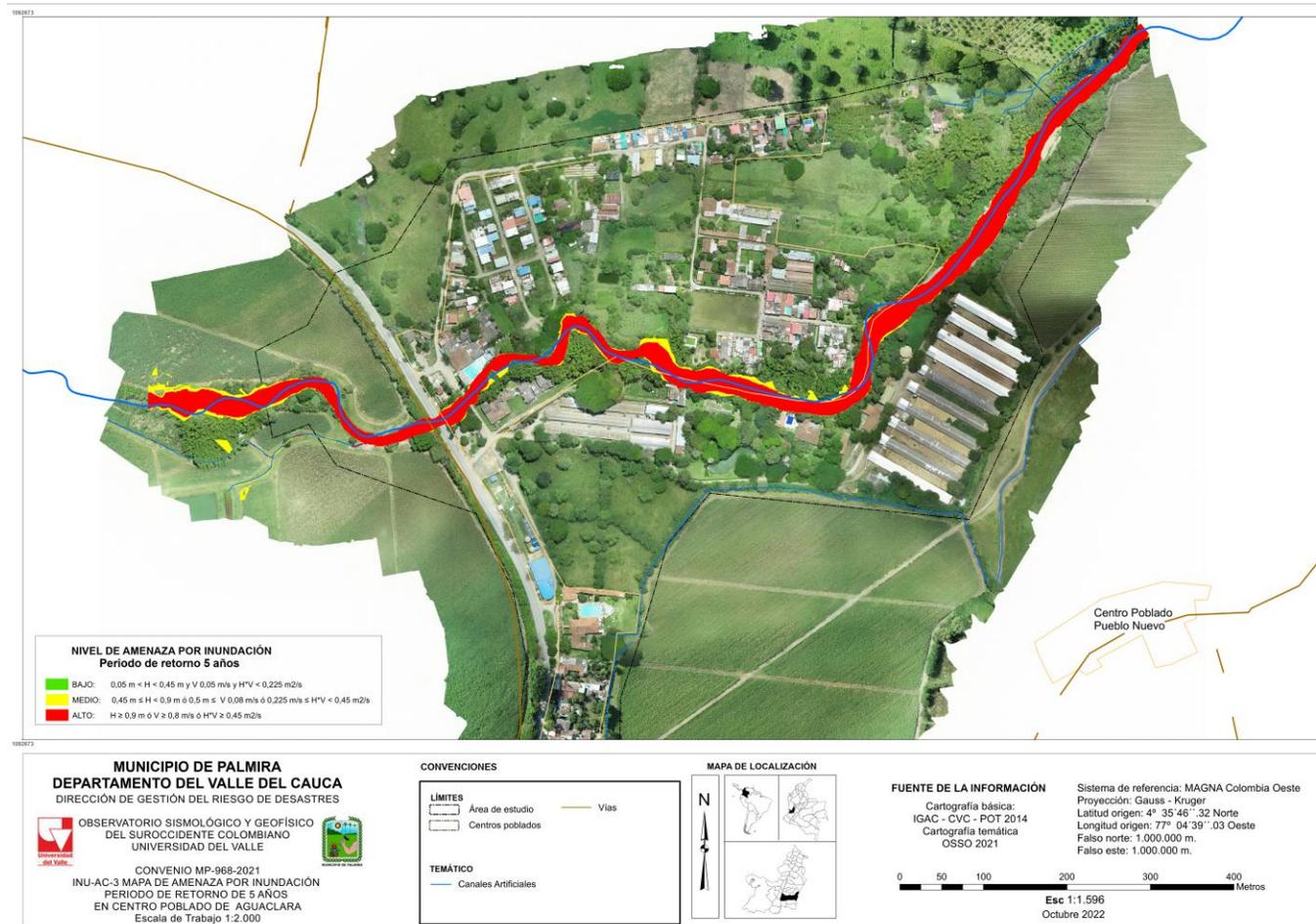


Figura 27. (INU-AC-3) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 5 años
Fuente: Elaboración propia

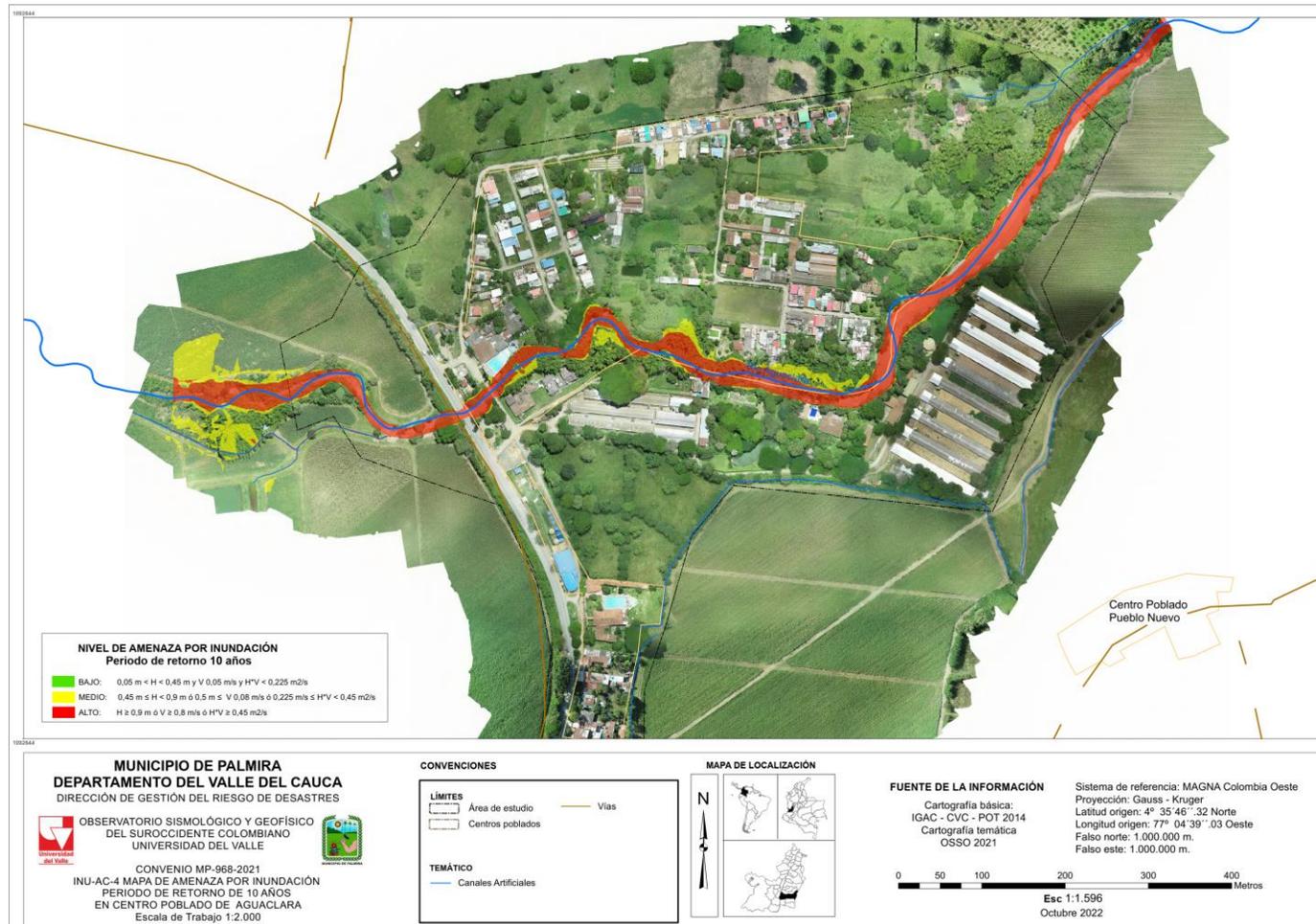


Figura 28. (INU-AC-4) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 10 años
Fuente: Elaboración propia

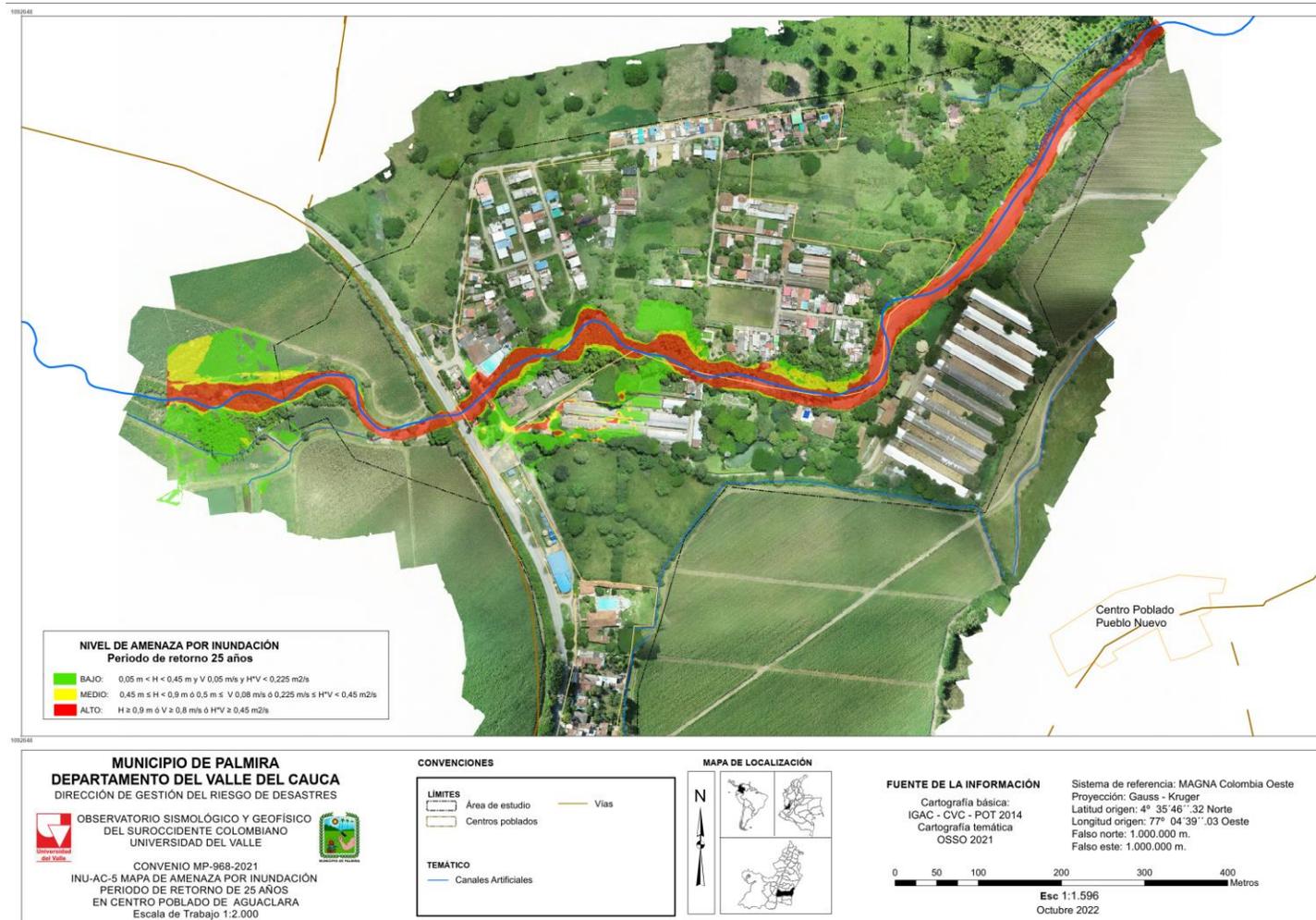


Figura 29. (INU-AC-5) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia

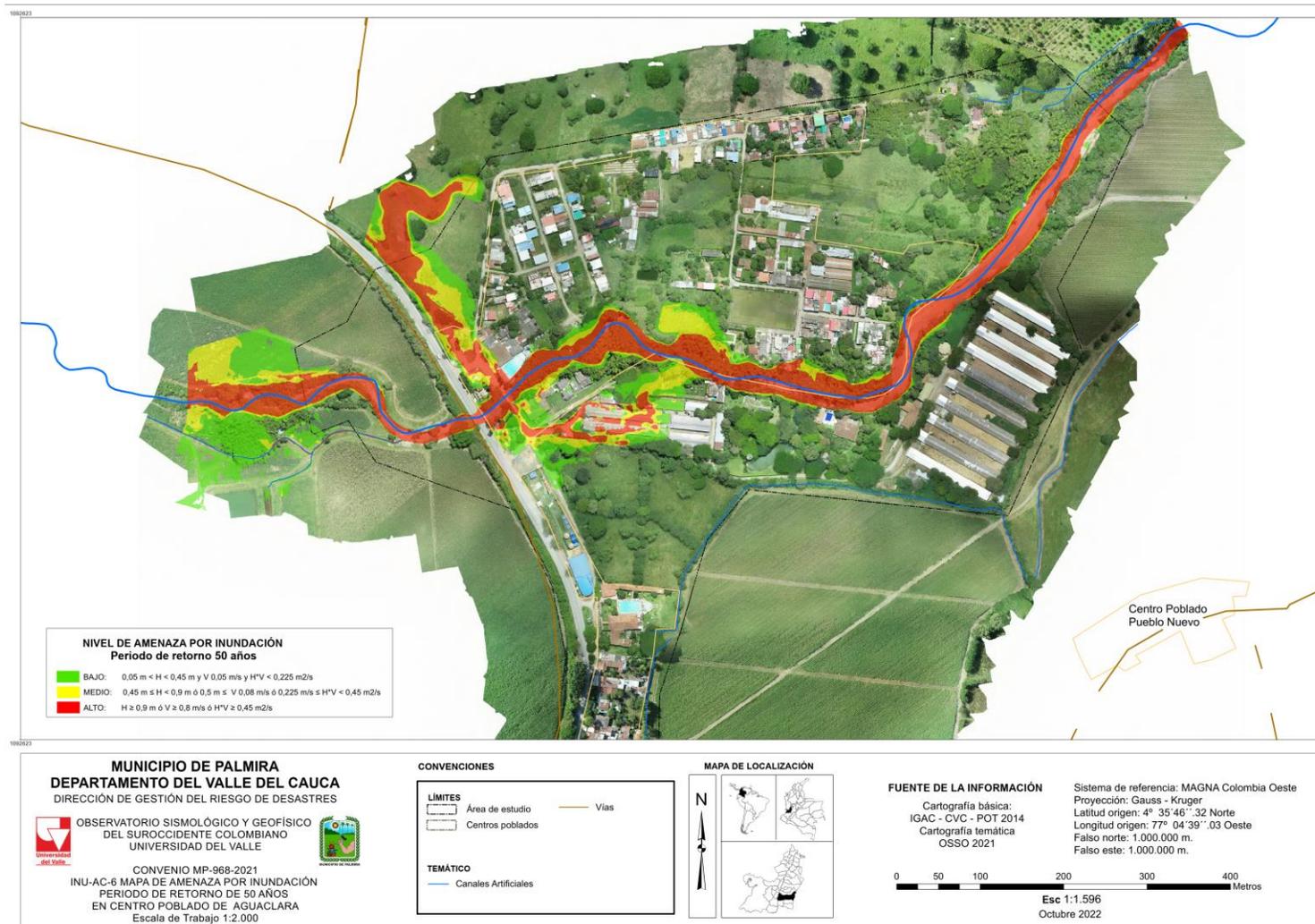


Figura 30. (INU-AC-6) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 50 años
Fuente: Elaboración propia

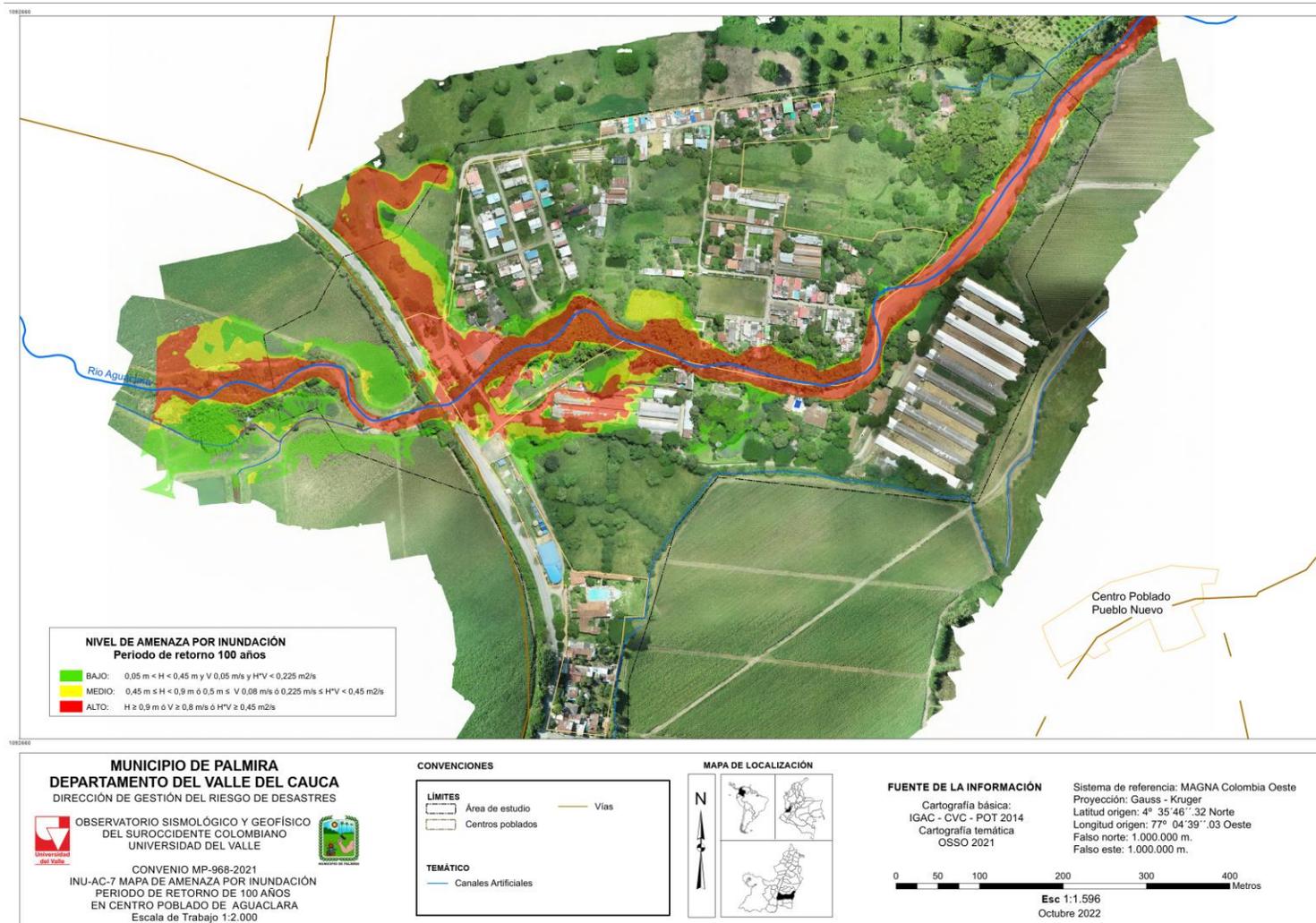


Figura 31. (INU-AC-7) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguaclara - Periodo de retorno de 100 años
Fuente: Elaboración propia

A partir de los mapas anteriores, se determina la envolvente de todos estos, con el objetivo de determinar el mapa de zonificación final de la amenaza por inundación por desbordamiento en el centro poblado de Aguaclara. Como resultado final se obtiene el mapa que se presenta en la Figura 32.

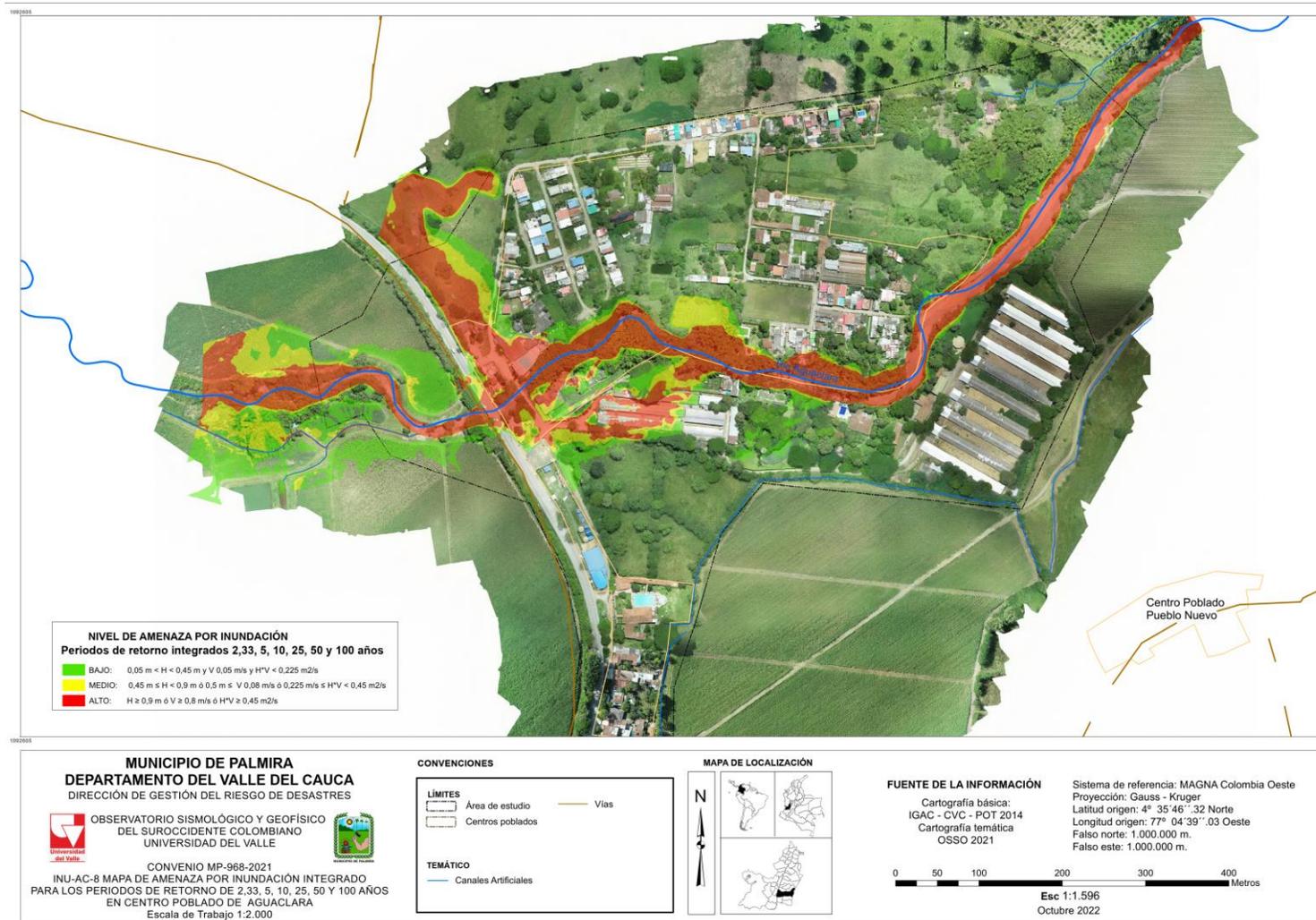


Figura 32. (INU-AC-8) Zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, centro poblado de Aguacalara – Mapa de zonificación final
Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

A partir de los caudales determinados por el estudio hidrológico y el levantamiento topográfico del río Aguaclara y la zona de estudio, fue construido el modelo hidráulico para el análisis y zonificación de la amenaza por inundación por desbordamiento. Se realizó la evaluación para 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno.

Para periodos 2,33, 5 y 10 años se observa que no hay desbordamientos, lo que indica una capacidad suficiente para caudales recurrentes en el río, mientras que para periodos de retorno de 25 años y más, se observa que se presentan desbordamientos, en especial, se identifica un represamiento del flujo al nivel de los puentes, lo que induce un desbordamiento de las aguas, especialmente sobre la margen derecha, donde se presentan las mayores profundidades de lámina de aguas desbordadas; sobre la margen derecha también se identifican desbordamientos. En especial para 100 años de periodo de retorno, se presentan importantes desbordamientos, afectando vías y construcciones en el centro poblado. La falta de capacidad hidráulica bajo los puentes favorece los perfiles de remanso, provocando inundaciones. En cuanto a las velocidades de flujo es posible identificar algunas zonas con concentración de altas velocidades, que favorecen los procesos erosivos.

La zonificación de la amenaza se realiza siguiendo una metodología basada en criterios que incluyen las variables de profundidad, velocidad y el producto de la profundidad y la velocidad de flujo. Considerando los 6 periodos de retorno antes mencionados, para finalmente obtener una zonificación que integra esos mismos periodos de retorno, considerada una zonificación final por amenaza por inundación. En este resultado final, se identifican construcciones y vías, en condiciones de amenaza alta y media.

7. REFERENCIAS

- Brunner, G. (2016). *HEC-RAS:River Analysis System* . Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic.
- Casanova, M. L. (2002). *Topografía Plana*. Universidad de Los Andes.
- Chero, W. E. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Barcelona.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. R., Ed.) McGraw Hill.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2011). *Acuerdo N° 052 de 2011 "Por medio del cual se subroga el Acuerdo 23 de septiembre 12 de 1979 por el cual se dicatan norma generales relativas a ubicación de diques riberaños de cauces de aguas de uso público"*. Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle. (2010). *Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales, del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, el Cairo y la Unión*. Cali: Universidad del Valle.
- Franquet, B. j. (2010). *Nivelacion de terrenos por regresión Tridimensional*. Bernis.
- IDEAM. (2017). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá, Colombia.
- Rodriguez Díaz, A. (2009). *Hidráulica Experimental*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2021). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Bogotá D.C.
- Universidad de Los Andes. (2002). En M. L. Casanova, *Topografía Plana*.
- US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center. (2021). *HEC-RAS River Analysis System - User's Manual Versión 6.0*. California.
- US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual*. Davis, California.
- US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual Version 5.0*. Davis, California.

8. ANEXOS

Anexo 01. Modelaciones HEC-RAS Aguaclara.