



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN CON MODELO BIDIMENSIONAL DE LA
QUEBRADA “CAUPICHO”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero e Ingeniera Civil

AUTOR: Isaac Fernando Gualotuña Proaño
Jimena Sara Guevara Mocha
TUTOR: Carlos Alejandro Bohórquez Barba

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Isaac Fernando Gualotuña Proaño con documento de identificación N° 1723557862 y Jimena Sara Guevara Mocha con documento de identificación N° 1724992852; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 19 de febrero del 2024

Atentamente,



Isaac Fernando Gualotuña Proaño
1723557862



Jimena Sara Guevara Mocha
1724992852

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Isaac Fernando Gualotuña Proaño con documento de identificación N° 1723557862 y Jimena Sara Guevara Mocha con documento de identificación N° 1724992852; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Análisis de riesgo de inundación con modelo bidimensional de la quebrada ‘Caupicho’”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de febrero del 2024

Atentamente,



Isaac Fernando Gualotuña Proaño
1723557862



Jimena Sara Guevara Mocha
1724992852

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Alejandro Bohórquez Barba con documento de identificación N° 1720297462, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN CON MODELO BIDIMENSIONAL DE LA QUEBRADA “CAUPICHO”, realizado por Isaac Fernando Gualotuña Proaño con documento de identificación N° 1723557862 y Jimena Sara Guevara Mocha con documento de identificación N° 1724992852, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Carlos Alejandro Bohórquez Barba, MSc.

1720297462

ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN CON MODELO BIDIMENSIONAL DE LA QUEBRADA “CAUPICHO” TWO-DIMENSIONAL MODELING FOR FLOOD RISK ANALYSIS OF THE “CAUPICHO” CREEK

Isaac Gualotuña-Proaño¹, Jimena Guevara-Mocha², Carlos Bohórquez-Barba³

Resumen

En el presente artículo, se expone el proceso de elaboración de un mapa de riesgo de inundación, que inicia con el reconocimiento in situ de las zonas afectadas por el desbordamiento de caudal de la quebrada “Caupicho”, producido por precipitaciones de magnitudes importantes, a partir del testimonio de los habitantes del sector, seguido del desarrollo del levantamiento topográfico de la quebrada analizada, y de las zonas aledañas; una vez digitalizada esta información, se realiza el estudio hidrológico para la determinación de hidrogramas representativos de los eventos de precipitación. A la par, en el paquete computacional IBER, se ingresan las características del terreno MDT, a partir del cual se representará el dominio computacional y que posteriormente nos permitirá generar una malla que se acople al modelo digital de elevación del terreno (MDT). Seguidamente, se desarrollan simulaciones para calibrar el modelo, realizando una comparativa con los calados del cauce constatados in situ. A continuación, se genera el mapa de riesgo de inundación considerando el calado y la velocidad que son resultados obtenidos del modelo.

Palabras Clave: Mapa de riesgo de inundación, modelación numérica bidimensional, hidrograma sintético (SCS), dinámica de fluidos computacional, precipitación neta.

Abstract

In this article, the process of developing a flood risk map is outlined. The process begins with on-site recognition of areas affected by the overflow of the "Caupicho" stream, caused by significant precipitation events, based on the testimony of local residents. This is followed by the topographic survey of the analyzed stream and the surrounding areas. Once this information is digitized, a hydrological study is conducted to determine representative hydrographs for precipitation events. Simultaneously, the terrain characteristics (MDT) are entered into the IBER computational package to represent the computational domain, which will later allow us to generate a mesh that fits the digital terrain model (MDT). Subsequently, simulations are conducted to calibrate the model, comparing it with the depths of the channel observed on-site. Next, the flood risk map is generated, considering the depth and velocity, which are results obtained from the model.

Keywords: Flood risk map, two-dimensional numerical modeling, synthetic hydrograph (SCS), computational fluid dynamics, net precipitation.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

² Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

³ Docente de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

Autores para correspondencia: igualotunap@est.ups.edu.ec ; jguevaram3@est.ups.edu.ec

1. Introducción

Las inundaciones pueden causar daños significativos a las estructuras, así como pérdidas materiales y humanas, también puede interrumpir actividades y servicios públicos causando impactos socioeconómicos negativos. En Ecuador, la falta de control y estudio de caudales sobre quebradas abiertas contribuye a generar esta problemática.

La modelación bidimensional es una herramienta válida para la evaluación del riesgo de inundación, a partir de modelos hidráulicos considerando diferentes escenarios posibles y de esta manera predecir el comportamiento del agua en un área determinada [1], culminando con la elaboración un mapa de riesgo para diferentes probabilidades de ocurrencia de los eventos.

Para la generación de diferentes escenarios, se construyeron varios hidrogramas mediante el uso de ecuaciones de intensidades máximas de precipitación proporcionadas por el INAMHI [2] aplicando el método del Soil Conservation Service (SCS) [3].

A partir de la aplicación del método de los Polígonos de Thiessen [4] se ha determinado que la estación Izobamba es aquella que entrega información representativa de los eventos de precipitación de la zona de estudio.

Una vez desarrollado el estudio hidrológico se realizó la modelación bidimensional [5] en el cual se ingresa la información obtenida y se generan varios escenarios que consisten en la variación de caudales considerando diferentes periodos de retorno (TR); por último, se clasifica las zonas de inundación considerando la ocurrencia del evento de precipitación, el uso del suelo, las velocidades del flujo y los niveles de alcance del calado[6].

1.1. Antecedentes

La quebrada “Caupicho” ha servido como sitio de descarga de los sistemas de drenaje pluvial del sur de la ciudad de Quito, lo que ha provocado que a lo largo de los últimos 15 años se presenten problemas en la descarga de caudales en este cauce, dando paso a numerosas inundaciones en diferentes puntos de la quebrada, por lo que, se han realizado encuestas a los habitantes del sector en el mes de Julio del 2023, quienes han declarado que persisten

los problemas en épocas invernales, en los cuales la lluvia provoca el incremento del caudal sobre la quebrada, y consecuentemente, se producen desbordamientos de la misma.

1.2. Hipótesis

La Quebrada “Caupicho” forma parte de una cuenca en la cual no se han realizado seguimientos hidrológicos, por lo que para estudiar esta cuenca se deberán utilizar métodos empíricos.

La contaminación y el desordenando crecimiento urbano han afectado al comportamiento de la escorrentía dentro de la cuenca referida[3], lo que causa un cambio de las condiciones para la infiltración y la precipitación neta, por lo tanto, la producción de escorrentía se altera a través de los años.

Los desastres naturales también intervienen en el comportamiento y la fluidez del caudal de la cuenca; por ejemplo, la reducción de la sección transversal del cauce por la presencia de basura o escombros que son arrastrados por la corriente, por lo que, si surge el taponamiento de alcantarillas existentes en la quebrada, se produce el desbordamiento del agua hacia zonas de ocupación de suelo urbano.

2. Materiales y Métodos

2.1. Objetivos

Recolectar información de los habitantes del sector, mediante encuestas con el fin de identificar los niveles alcanzados del calado en eventos históricos de la quebrada.

Generar el modelo digital de elevaciones (MDT) mediante la utilización de equipos de precisión RTK, Drone y GPS GNSS para caracterizar la zona de estudio.

Desarrollar el análisis hidrológico de la quebrada con el uso del método SCS, acompañado de criterios que permitan el desarrollo de este método, para la obtención de hidrogramas representativos de eventos de precipitación la cuenca.

Establecer las condiciones de contorno del dominio computacional y generar el modelo bidimensional dentro del paquete computacional IBER con la información generada en el estudio hidrológico para la generación de distintos escenarios.

Generar el mapa de riesgo de inundación creando una envolvente de los escenarios e identificar las zonas de mayor y menor riesgo mediante una escala de colores.

2.2. Área de estudio

Para delimitar el área de estudio se tomó en cuenta la información recopilada respecto a las inundaciones que han ocurrido como consecuencia del desbordamiento de la quebrada Caupicho, como por ejemplo los eventos registrados el 5 de julio de 2023 y el 12 de abril de 2020, los cuales han sido documentados por medios de comunicación escrita, y los testimonios de los moradores del barrio Urinsayas, respecto al alcance de la cota de la lámina de agua y las zonas afectadas durante los mencionados sucesos. A partir de estos datos, se ha delimitado la siguiente zona de estudio.

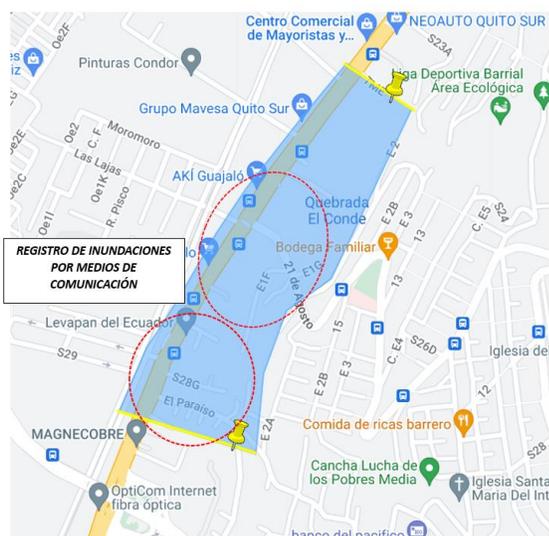


Figura 1. Área definida para el estudio

2.3. Metodología

Construcción del Modelo Digital del Terreno

Para poder generar el MDT del área de estudio, se debe utilizar equipos de precisión RTK, con el fin de obtener una adecuada resolución y generar información con alto grado de precisión para la caracterización de la zona de estudio.

Por lo indicado, se utilizó un Drone Dji Phantom Pro V4.0 para generar el MDT y se tomaron puntos de control con un GPS GNSS para la ubicación georreferenciada en sistema de coordenadas TM WGS-84.

Sobre la base de esta información, se genera la planimetría, la cual es esencial para la representación bidimensional del terreno [7], para poder identificar y resaltar zonas específicas de interés dentro de la zona de estudio.



Figura 2. Ortofoto generada del área de estudio en coordenadas TM WGS-84.

Uso de suelo

Es fundamental identificar las áreas de ocupación del terreno, con el fin de poder asignar las características de cada una de ellas, y de esta manera generar una correcta representación del

terreno en un modelo bidimensional, así también, poder categorizar el riesgo que podría tener cada una de estas áreas.

Tabla 1. Uso de suelo

Color	Descripción
Verde	Río, quebrada
Azul	Industria
Morado	Zona residencial
Amarillo	Espacios verdes
Celeste	Zonas viales, carreteras



Figura 3. Asignación del uso de suelo

Coefficientes de Rugosidad de Manning

La estimación de un coeficiente de rugosidad de Manning para los diferentes usos de suelo es esencial, debido a que la resistencia del flujo sobre las diferentes superficies varía dependiendo de las características de cada uno de estos [8].

Dado que, se ha inspeccionado todo el cauce de la quebrada a lo largo del área de estudio se estimó un coeficiente de rugosidad específico para este, empleando el método multiparamétrico de Cowan (1), que considera los siguientes aspectos:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (1)$$

Donde:

n_0 = El material involucrado [8], en roca.

n_1 = El grado de irregularidad es suave [8], dado que en varios tramos la sección está definida por secciones uniformes.

n_2 = Las variaciones de la sección transversal es gradual [8], debido a la presencia de obras civiles que delimitan el cauce, lo que ocasiona regularidad en la sección y se logra un cambio gradual de la misma.

n_3 = El efecto relativo de las obstrucciones [8] es insignificante, por la presencia de poca contaminación constatada por los autores y obras de limpieza que realiza el municipio del DMQ.

n_4 = La vegetación presente es baja [8], debido a la limpieza y remoción en varios tramos que realiza el municipio.

m_5 = El grado de los efectos por meandros es menor [8], por las curvas poco pronunciadas que presenta la quebrada, esto se aprecia en la ortofotografía del MDT.

Tabla 2. Valores que intervienen en la rugosidad del cauce [8]

Descripción	Valor
n_0	0.020
n_1	0.000
n_2	0.000
n_3	0.000
n_4	0.005
m_5	1.000

Por lo tanto, el coeficiente de rugosidad de Manning para el cauce es de 0.025.

Para el resto de áreas de ocupación se asignaron las rugosidades de la base de datos del paquete computacional IBER [5] en función de las características evidenciadas in situ.

Tabla 3. Coeficientes de rugosidad de Manning [5]

Uso	Valor
Espacios verdes	0.032
Industria	0.1
Zona residencial	0.15
Zona de circulación vial, carretera	0.1

Cuenca definida para el estudio hidrológico

Para poder desarrollar el estudio hidrológico se debe delimitar una cuenca que acarree los caudales hacia la quebrada [9], es por esto que a partir de las cartas topográficas del IGM se realizó el trazado de la cuenca respectiva, cuyas características son las siguientes:

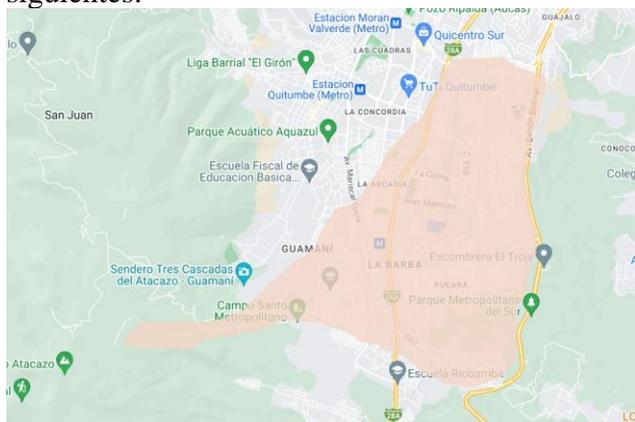


Figura 4. Cuenca generada para el estudio hidrológico [9]

Tabla 4. Datos generales físicos morfométricos de la cuenca de estudio

Descripción	Valor
Nombre	Quebrada Caupicho
Área	28.5 km ²
Pendiente Media	8.5%
Longitud del cauce principal	12.25 km
Tiempo de concentración	70 min

Teniendo en cuenta que, la cuenca de la quebrada Caupicho no cuenta con un estudio hidrológico, se realizó el desarrollo del mismo.

Polígonos de Thiessen

El INAMHI cuenta con una red de estaciones pluviográficas en todo el territorio nacional, sin embargo, debido a que la cuenca de la Quebrada Caupicho no cuenta con una estación que registre los datos pluviométricos sobre esta, se debe determinar una estación cercana cuyos datos puedan adoptarse como representativos para el estudio; por tal motivo, mediante el método de los polígonos de Thiessen [4] se establece que la estación de Izobamba es la que proporciona datos representativos de la zona de estudio.

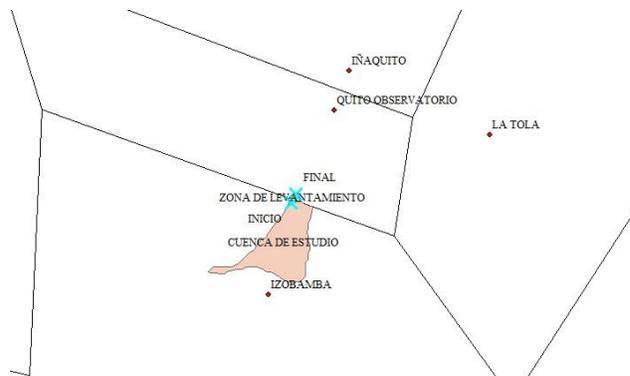


Figura 5. Polígonos de Thiessen [4]

El método de los polígonos de Thiessen consiste en la construcción gráfica para dividir áreas de influencia asociado con un punto cercano de estudio, en este caso, el inicio del área de estudio [4].

Ecuaciones de intensidades máximas

Las ecuaciones de la estación pluviográfica Izobamba se utilizaron para el diseño de hietogramas y la posterior creación de hidrogramas de corta duración y gran intensidad [2].

Tabla 5. Ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas

Intervalo de tiempo (min)	Ecuaciones
5<30	$i = 164.212 * T^{0.1650} * t^{-0.4326}$
30<120	$i = 371.072 * T^{0.1575} * t^{-0.6771}$

Hietograma de diseño

Una vez establecidos los parámetros físicos morfométricos, y considerando que la cuenca de la Quebrada Caupicho no cuenta con un estudio hidrológico propio, se emplea la metodología adecuada para obtener la precipitación que se presentará dentro de la misma; es por esto que, al no tener registro de tormentas anteriores de la cuenca se determinaron los hietogramas a partir del método del bloque alterno [10].

El método del bloque alterno consiste en determinar el hietograma de diseño bajo los supuestos de que la precipitación extrema se produce en bloques de tiempos cortos y separados por periodos de tiempos más secos [11].

Número de curva

El número de curva (CN) depende del tipo y uso de suelo, valor que se establece en función de las características de ocupación del suelo, es por esto que, se asignó el valor CN en base al Grupo C debido a que la cuenca cuenta con una gran parte de extensión urbana, el cual establece que su capacidad de infiltración es baja, y cuando el suelo se encuentra húmedo su infiltración es lenta [10].

Tabla 6. Selección CN 1

Uso de Suelo	CN	% SUPERFICIE
Área Residencial (25% impermeable)	80	50
Calles pavimentadas y alcantarillado	95	30
Áreas abiertas (50-75% cubierta de pasto)	79	20
CN		84.3

También se definió otro valor CN en condiciones menos favorables, es decir, que el suelo presente condiciones húmedas.

Tabla 7. Selección CN 2

Uso de Suelo	CN	% SUPERFICIE
Área Residencial (38% impermeable)	83	50
Calles pavimentadas y alcantarillado	95	30
Áreas abiertas (+ 50-75% cubierta de pasto)	79	20
CN		82.8

Precipitación Neta

La precipitación neta es la cantidad de la precipitación que llega al cauce principal [12], es decir, que genera escorrentía directa; el método SCS para abstracciones considera que la precipitación que no sobrepasa el umbral del 20% de la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (S) no genera escorrentía superficial, sino que se infiltra en el suelo[13]; otro punto a favor de este método, es que el número de curva (CN) considera la ocupación y grado de humedad del suelo [14]; y

de esta manera, generar hietogramas para diferentes escenarios.

Por lo indicado, se generaron los hietogramas a partir de la aplicación del método SCS para abstracciones, utilizando los dos tipos de CN propuestos y tiempos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, y de esta manera generar hidrogramas que van a ser analizados en la modelación bidimensional [15].

Aplicando la expresión de Kirpich (2) se determinó el tiempo de concentración, que nos indica cuánto demora en recorrer una gota de agua en toda la longitud del cauce principal.

$$tc = 0.01947 * L^{0.77} * S^{-0.385} \quad (2)$$

Donde:

tc = tiempo de concentración de la cuenca. [min]
 L =Longitud del cauce principal desde aguas arriba hasta el punto de salida. [km]
 S =Pendiente media. [m/m]

La ecuación de Kirpich se desarrolló a partir del método SCS en cuencas donde las pendientes son muy empinadas (8%-10%) [16], por lo que se ajusta a las características físicas y metodológicas de la cuenca de la Quebrada Caupicho, a partir de la cual, se obtuvo un tiempo de concentración de 70.74 min.

Con base en esta información, el tiempo que se considera para la generación de los hietogramas es de 70 min, en los cuales se tomarán intervalos de 10 minutos con el fin de representar la escorrentía en el tiempo descrito.

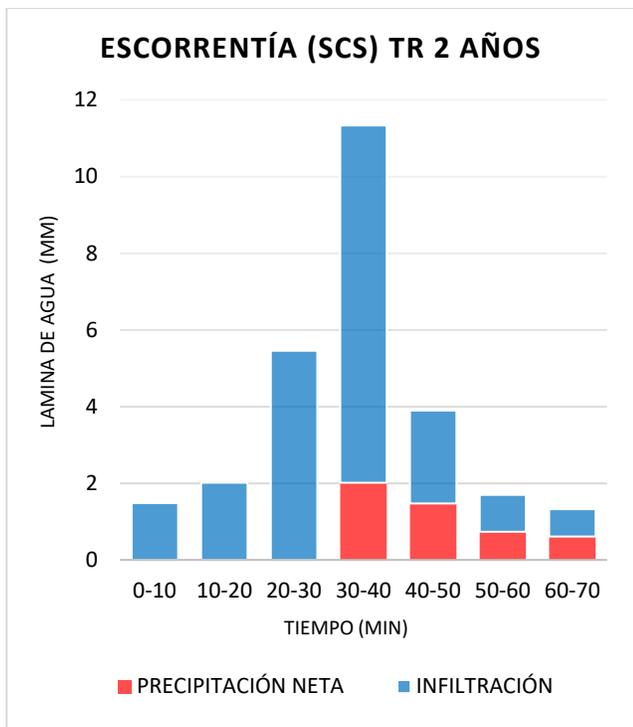


Figura 6. Hietograma (SCS) TR 2 años

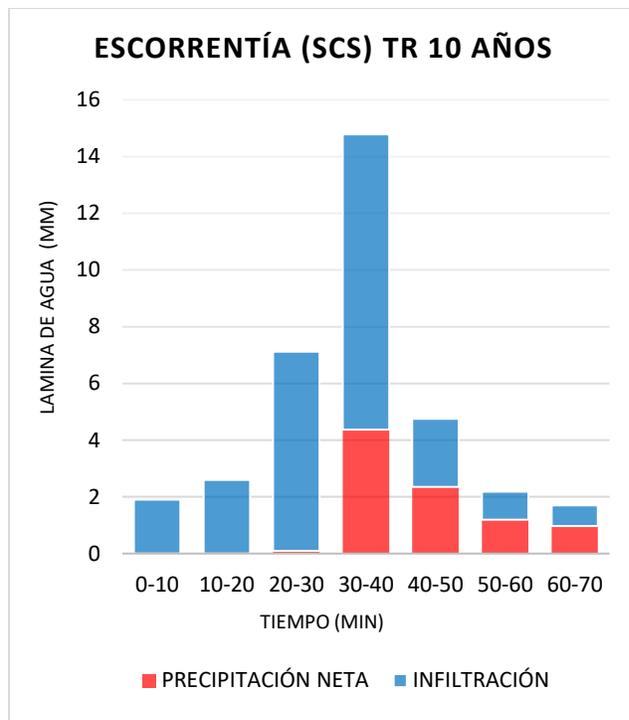


Figura 8. Hietograma (SCS) TR 10 años

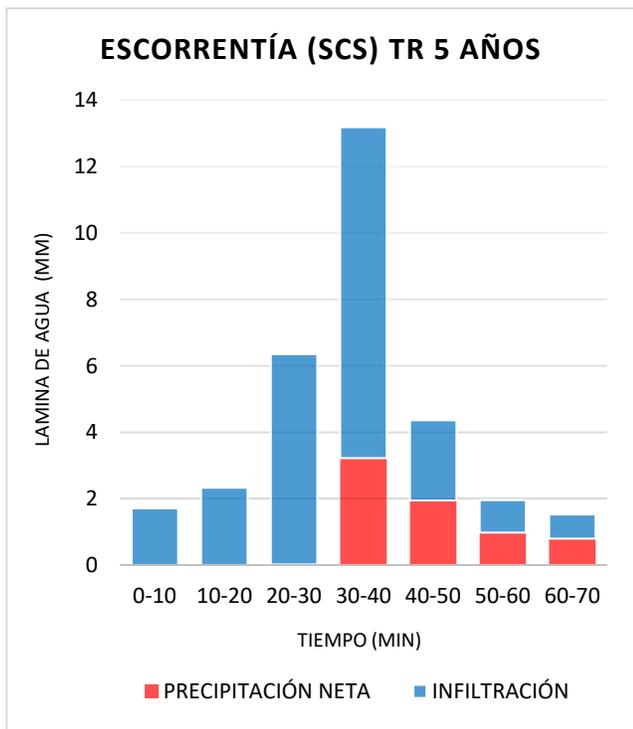


Figura 7. Hietograma (SCS) TR 5 años

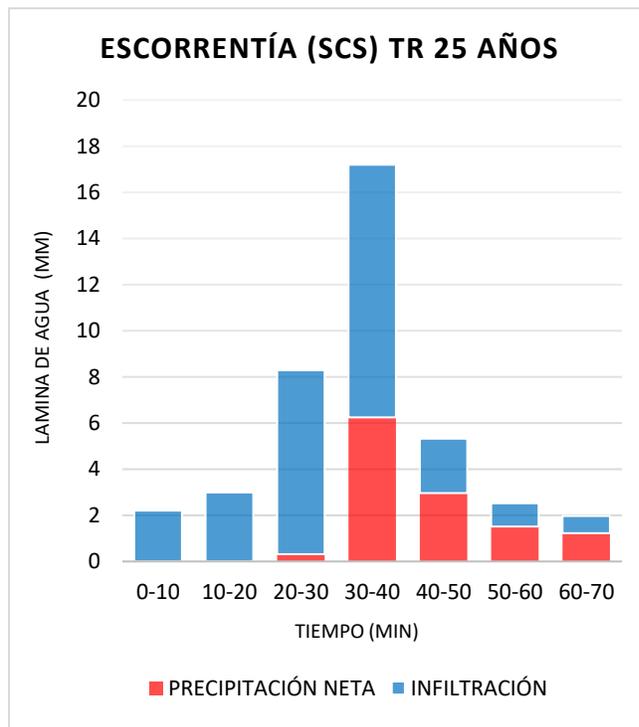


Figura 9. Hietograma (SCS) TR 25 años

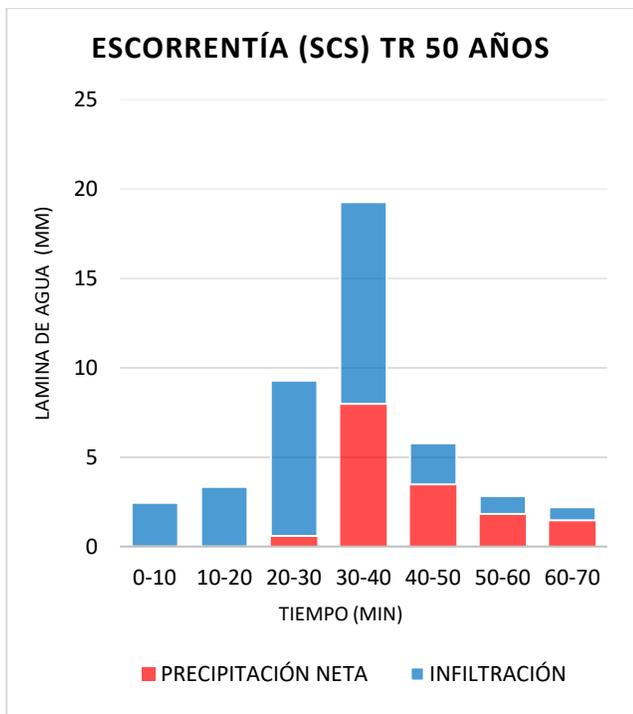


Figura 10. Hietograma (SCS) TR 50 años

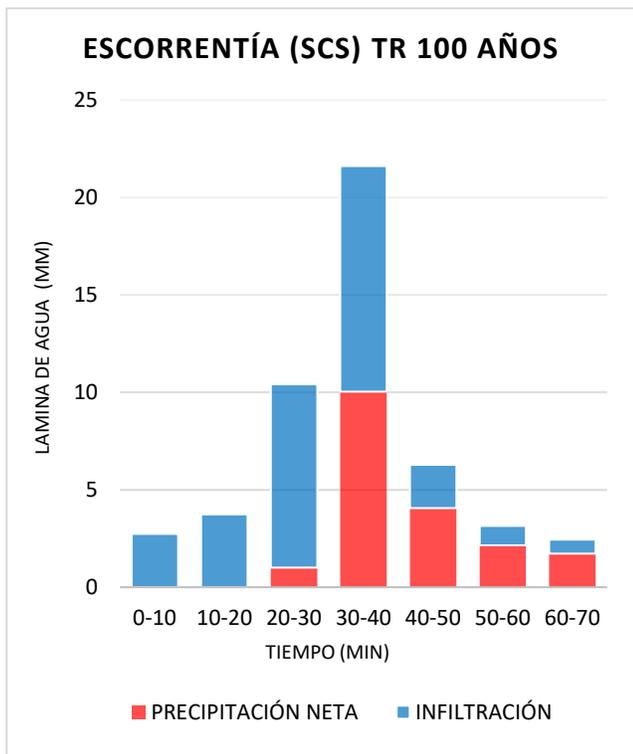


Figura 11. Hietograma (SCS) TR 100 años

Hidrograma Sintético (SCS)

El hidrograma sintético del SCS es una representación gráfica que se basa en la premisa de

que la escorrentía se genera en dos etapas; la primera considera que la precipitación que supere el umbral del $0.2S$, genera escorrentía directa debido a que se presenta una saturación del suelo; mientras que, en la segunda etapa, se considera el supuesto que es una escorrentía que se distribuye a lo largo del evento de precipitación [17]; el punto de unión de estas dos etapas es el caudal pico (q_p). El método SCS sugiere que cuando se da la escorrentía máxima, este valor llega a la unidad, es decir, los eventos de precipitación están en función del hidrograma adimensional del SCS.

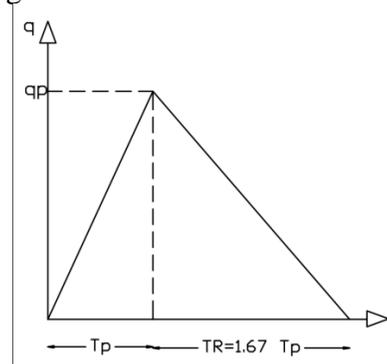


Figura 12. Hidrograma adimensional SCS [18]

El tiempo de concentración de la cuenca es de 70.74 min, y para continuar con el desarrollo del hidrograma sintético SCS se debe calcular el tiempo para alcanzar el caudal pico (t_p) siendo este el 70% del tiempo de concentración (t_c) según el método del hidrograma adimensional [18].

A continuación, con los datos obtenidos de precipitación neta, se obtuvo el caudal pico por cada intervalo de precipitación neta (P_n) y en cada tiempo de retorno (TR), por lo tanto, se generaron los hidrogramas que han sido evaluados en la modelación bidimensional.

La elaboración de los hidrogramas del SCS generan valores en eventos de precipitación en condiciones extremas, por lo que el mapa de riesgo de inundación desarrollado se basa en esta metodología [19].

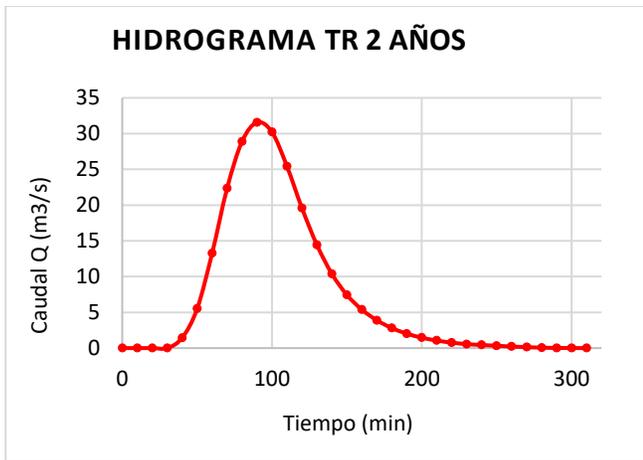


Figura 13. Hidrograma (SCS) TR 2 años

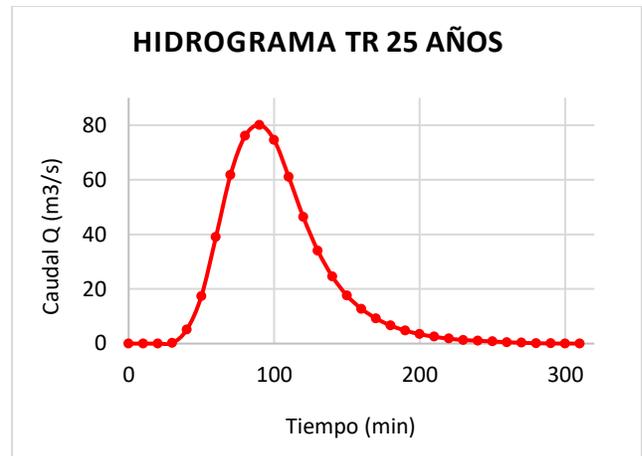


Figura 15. Hidrograma (SCS) TR 25 años

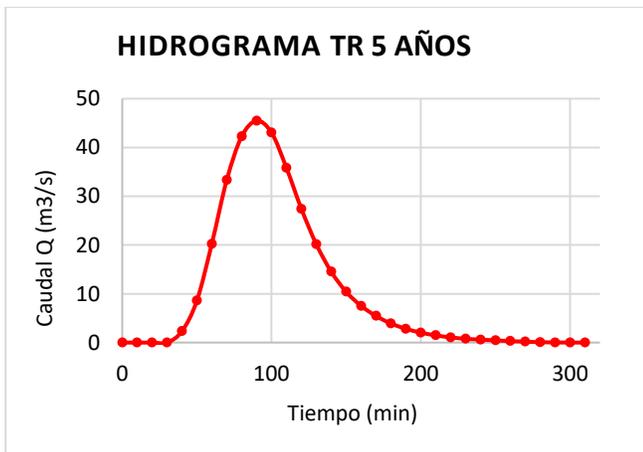


Figura 14. Hidrograma (SCS) TR 5 años

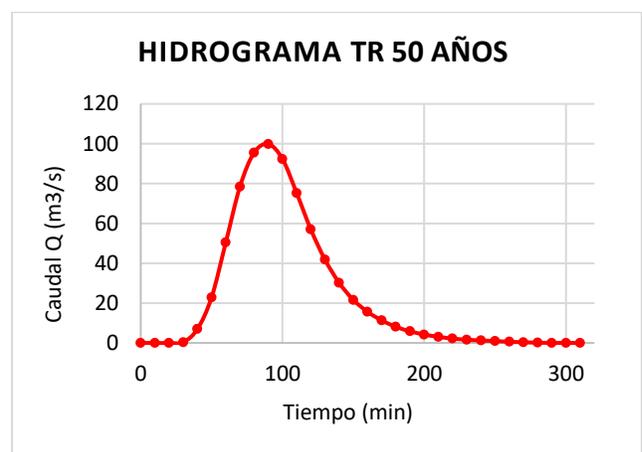


Figura 16. Hidrograma (SCS) TR 50 años

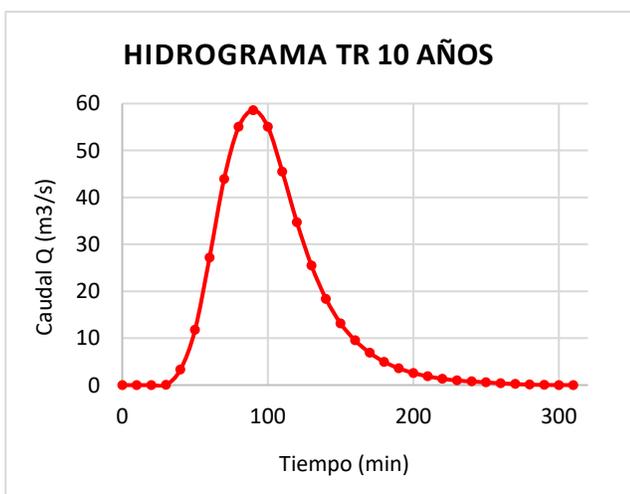


Figura 15. Hidrograma (SCS) TR 10 años

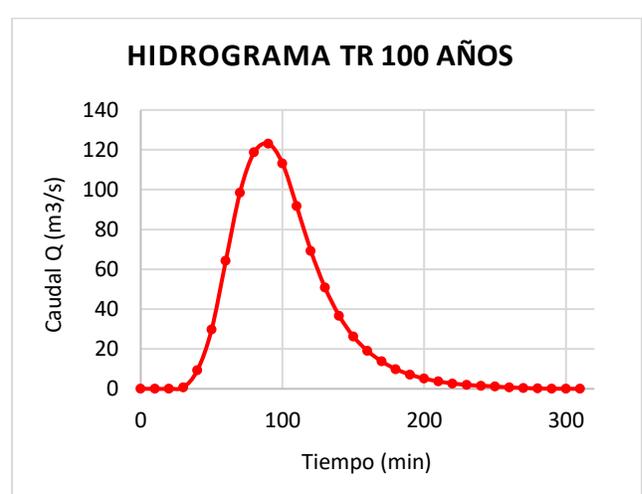


Figura 17. Hidrograma (SCS) TR 100 años

Dinámica de fluidos teórica

Las ecuaciones de Navier-Stokes, gobiernan el comportamiento de los fluidos, las cuales han sido obtenidas a partir de la aplicación de los principios de la conservación de la mecánica y de la termodinámica a un volumen finito [20].

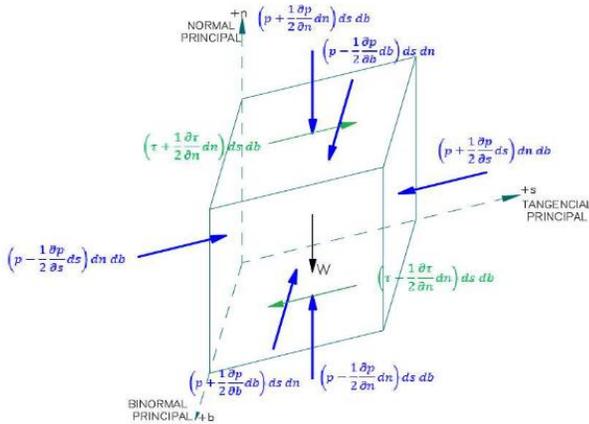


Figura 18. Esquema de fuerzas actuantes en una partícula idealizada del fluido [20]

Estas ecuaciones son muy complejas para su utilización y desarrollo, debido a la presencia de fluctuaciones turbulentas en vórtices pequeños, por lo que se opta a simplificarlas; de manera que, utilizando un promedio temporal se filtran estas fluctuaciones mediante la descomposición de Reynolds dando paso a las RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) donde una variable cualquiera es descompuesta en una componente promedio de velocidad V_m y un componente fluctuante de la velocidad V' [21].

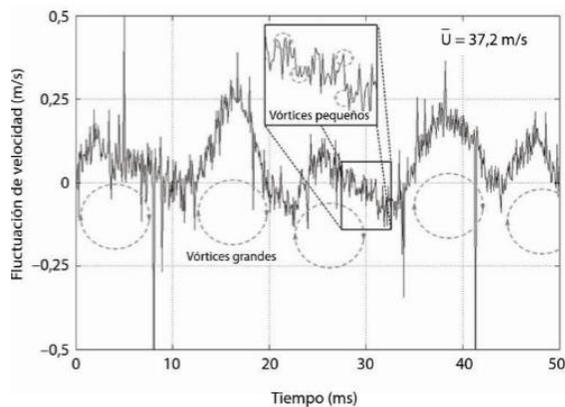


Figura 19. Fluctuaciones de velocidad a través del tiempo. [20]

Dinámica de fluidos computacional

Las ecuaciones de Navier-Stokes son utilizadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante soluciones aproximadas; para la creación de los modelos computacionales tridimensionales de los fluidos se discretizan estas ecuaciones, las cuales son resueltas por aproximaciones en los bloques o celdas generadas dentro del dominio computacional [20].

Para los modelos bidimensionales, las ecuaciones RANS se simplifican dando paso a las ecuaciones de Saint Venant, este proceso consiste en promediar el eje referencial al de profundidad convirtiendo las ecuaciones tridimensionales a bidimensionales (3).

$$\left(\frac{1}{A} \frac{\delta Q}{\delta t}\right) + \left(\frac{1}{A} \frac{\delta}{\delta x} \frac{Q^2}{A}\right) + \left(g \frac{\delta y}{\delta x}\right) - (gS_0) + (gS_f) = 0 \quad (3)$$

El paquete computacional IBER utiliza las ecuaciones de Saint Venant, resolviéndolas mediante aproximaciones con el método de los elementos finitos en cada celda de control que forma parte de dominio computacional [22].

Mallado

El mallado es la discretización o división del dominio computacional, para que en cada uno de estos elementos se lleve a cabo la solución de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los fluidos. Existen dos tipos de mallas dentro del paquete computacional IBER; la malla estructurada, consiste en generar celdas de control en forma de cuadriláteros y permite una mayor fluidez en la realización del cálculo debido a que los nodos se mantienen de manera secuencial, pero no pueden acoplarse a geometrías complejas. Mientras que, la malla no estructurada consiste en generar una geometría automática, de geometría variable, lo que permite adaptarse a los MDT pero implica un mayor costo computacional.

Para la modelación bidimensional se adoptó un mallado no estructurado debido a que es necesario el acoplamiento de la malla con el MDT de la zona de estudio. El tamaño de cada celda se la asignó mediante las superficies creadas en el dominio computacional, las cuales fueron descritas en la figura 3.

Tabla 7. Tamaño de malla no estructura en el dominio computacional

Descripción	Tamaño (m)
Cauce	1.00
Espacios verdes	3.00
Industria	3.00
Zona residencial	3.00
Zona de circulación vial, carretera	3.00



Figura 20. Mallado

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definen las características hidráulicas en las zonas de interés dentro del dominio computacional. Las condiciones de entrada “Inlet” se definen con el ingreso de caudales, mientras que los “Outlet” son las salidas del flujo en las zonas especificadas.

Al tener un cauce definido en la zona de estudio, el “Inlet” se asignó en la frontera sur del dominio, donde inicia la simulación e ingresan los caudales de los hidrogramas generados previamente.

Mientras que, el “Outlet” se asignó a toda la frontera norte, este y oeste del dominio, y de esta manera queriendo simular las alternativas de salida del fluido frente al desborde del cauce de la quebrada.

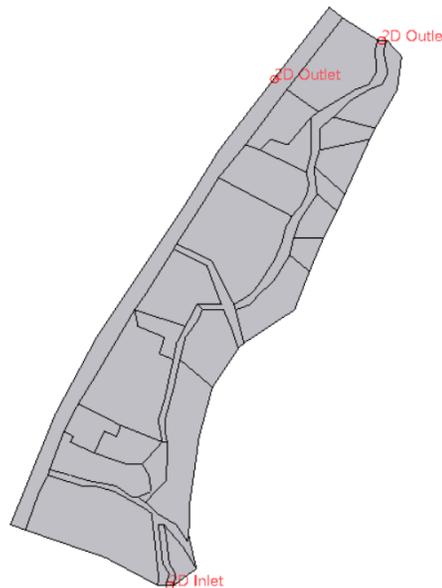


Figura 21. Condiciones de contorno

Estructuras hidráulicas existentes

El embaulamiento en tramos del cauce de la quebrada ocurre por la necesidad de la ocupación del suelo para desarrollar actividades humanas, por lo que se implementan este tipo de estructuras que permiten el flujo de caudales.

Dentro de la zona de estudio se presentan dos obras hidráulicas tipo alcantarilla, que permiten el flujo del cauce en condiciones de confinamiento, las cuales han sido implementadas dentro de Iber, con las formas y dimensiones existentes.

Tabla 8. Ubicación de estructuras hidráulicas

Alcantarilla 1			
Ubicación sección de ingreso	X: 496024	Y: 9968120	Z: 2886.64
Ubicación sección de salida	X: 496031	Y: 9968280	Z: 2884.50
Tipo Dimensiones	Circular 3m		
Alcantarilla 2			
Ubicación sección de ingreso	X: 496095	Y: 9968510	Z: 2882.95
Ubicación sección de salida	X: 496031	Y: 9968520	Z: 2881.72
Tipo Dimensiones	Rectangular B= 12m H=3m		

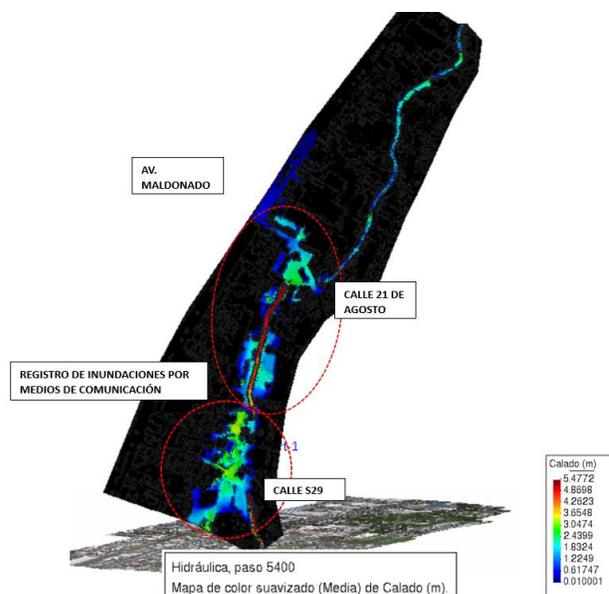


Figura 22. Modelo bidimensional TR 5 años en caudal pico.

3. Resultados y Discusión

Para el postprocesamiento de las modelaciones bidimensionales se estableció que el tiempo máximo de simulación fuese igual al valor del hidrograma del evento de precipitación, y presentar resultados por cada intervalo de tiempo definido por la precipitación neta.

Como nos indica Bohórquez [20], la calibración de los modelos es fundamental para validar los resultados obtenidos en las simulaciones, por tal razón, con la información del evento registrado el 12 de abril del 2020 y las encuestas realizadas por los autores a los habitantes del sector, se determinó que en el modelo bidimensional que considera el hidrograma generado para un TR 5 años, el calado alcanza los niveles que se han evidenciado durante los eventos registrados, como se muestra en la figura 22. Por lo cual, los escenarios de TR 2, 10, 25, 50 y 100 años serán representativos de precipitaciones de mayor y menor intensidad según corresponda.

Debido a que no existen registros exactos del alcance de nivel de agua determinados por expertos o entidades competentes, el modelo no se reajusta, por lo tanto, la validez de las simulaciones se basa en los niveles de apreciación que han declarado los habitantes y afectados de la zona a las encuestas realizadas por los autores y en eventos reportados por los medios de comunicación.

La simulación bidimensional entrega resultados de cotas de alcance del agua, velocidades y número de Froude, para la realización del mapa de riesgo, nos compete analizar los resultados de calado de agua y la velocidad del flujo.

Analizando el escenario con el hidrograma generado de TR 5 años, la cota máxima de inundación se presenta en la figura 22, teniendo un valor de 5.47m en el sector de la calle 21 de agosto, lo que genera un desbordamiento del cauce de la quebrada afectando las construcciones aledañas como la institución educativa Francisco Salazar, tal y como se presenció en el evento del 12 de abril de 2020.

La otra zona afectada que se presencia en la figura 22 es en la calle S29, lugar que, según las encuestas realizadas, es muy propenso a inundarse de manera frecuente y alcanzando las cotas obtenidas en la simulación.

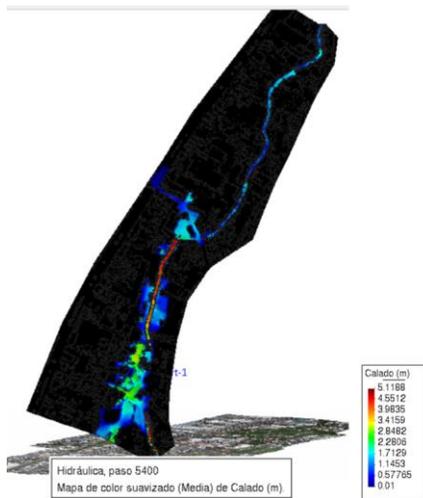


Figura 23. Modelo bidimensional TR 2 años en caudal pico.

El modelo de la figura 23, el cual representa un escenario de evento de precipitación menos crítico frente al modelo tomado de calibración (figura 22) indica un comportamiento menos crítico en cuanto al alcance de nivel de agua, por este motivo, para la generación del hidrograma se utilizó el CN menos favorable, es decir, cuando el suelo presenta humedad, lo que implica la generación de mayor escorrentía frente a estas condiciones; es importante destacar que, al tener un tiempo de retorno (TR) menor, es probable que este hidrograma se haga presente en condiciones húmedas del suelo.

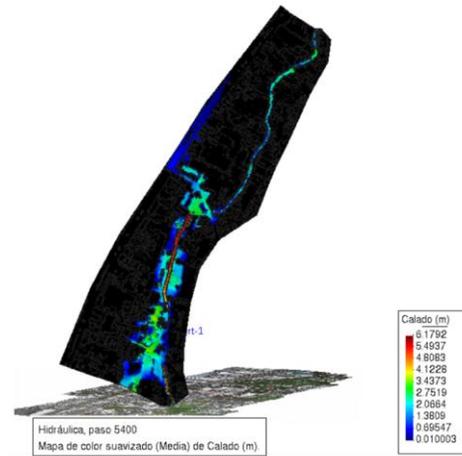


Figura 24. Modelo bidimensional TR 10 años en caudal pico.

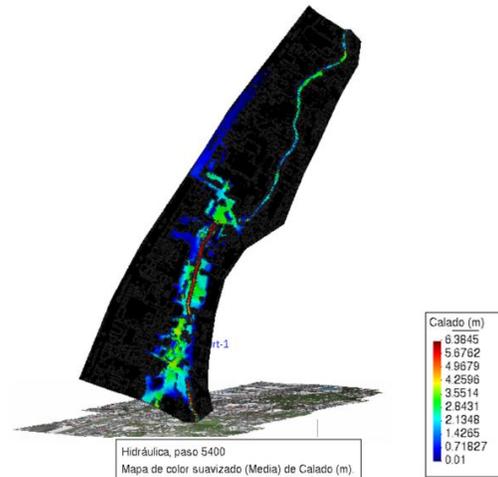


Figura 25. Modelo bidimensional TR 25 años en caudal pico.

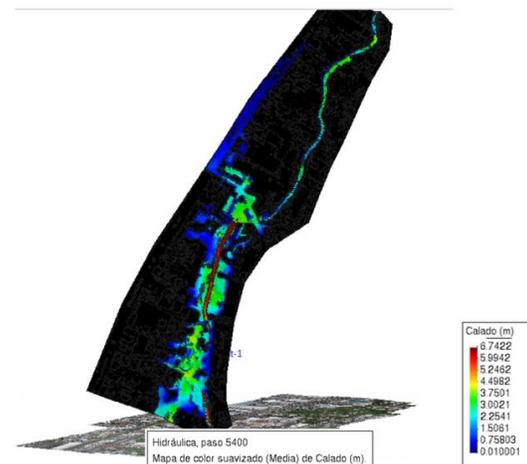


Figura 26. Modelo bidimensional TR 50 años en caudal pico.

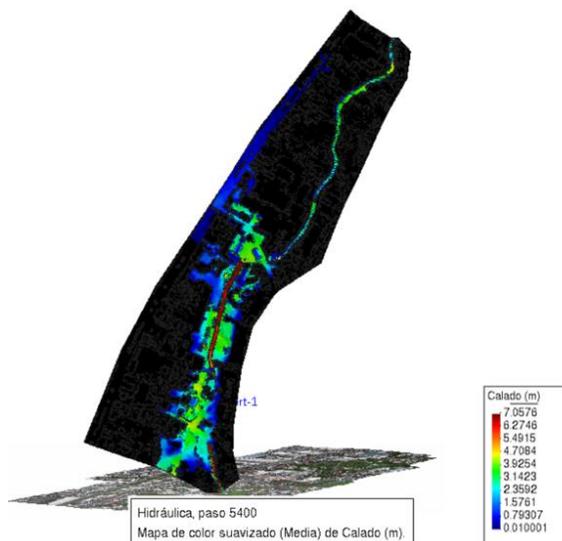


Figura 27. Modelo bidimensional TR 100 años en caudal pico.

Los resultados de los escenarios del modelo generado representados en la figura 24, 25, 26 y 27 demuestran los aumentos de niveles, y las zonas en las cuales hay presencia de agua por causa del desbordamiento; a partir de esta información se desarrolla el mapa de riesgo de inundación, considerando parámetros como el uso del suelo, el nivel de importancia de las edificaciones, la velocidad del flujo, la probabilidad de ocurrencia y el calado del flujo como nos indica el Ministerio Federal de Agricultura, silvicultura, medio ambiente y gestión del agua en Alemania [6].

$$I = v * h$$

Donde:

I: Intensidad de inundación [m²/s]

v: velocidad del flujo [m/s]

h: cota de inundación [m]

Esta expresión relaciona el peligro de inundación con las velocidades y niveles de alcance de agua, acompañado de un criterio cualitativo donde se estudia el grado de vulnerabilidad dependiendo del uso de la zona en la que se presentan las inundaciones.

Los rangos de riesgo de inundación considerados en el mapa son los siguientes:

Riesgo alto: Presentan niveles de hasta 4 metros desde el nivel natural del suelo con velocidades no mayores a 2 m/s, siendo muy propensos a inundarse frente a varios escenarios.

Riesgo medio: Niveles entre 2 y 1 metro de altura, con velocidades menores a 0.5 m/s, en escenarios considerablemente propensos a inundarse.

Riesgo considerado: Niveles menores a 1 metro, con velocidades menores a 0.1 m/s, en escenarios considerablemente propensos a inundarse.

Riesgo leve: Niveles menores a 1 metro, con velocidades menores a 0.05 m/s, en escenarios bajamente propensos a inundarse.

Anexo 1. Mapa de riesgo de inundación.

4. Conclusiones

La información recolectada en las encuestas fue indispensable para la validación de datos, debido a que se necesitó verificar los resultados de la modelación con los registros de los eventos de precipitación, y de esta manera calibrar la modelación.

La calidad del Modelo Digital del Terreno interviene en la precisión de la obtención de las zonas de inundación, por lo que al haber utilizado equipos de alta precisión los resultados son más fiables.

La generación de hidrogramas por el método SCS crea eventos de precipitación extremos, por lo que, el mapa de riesgo de inundación cubre una mayor extensión de áreas propensas a inundarse.

La consideración del grado de humedad en el número de curva (CN) entrega una mejor certeza con las condiciones probables frente a eventos de precipitación extremos.

Las condiciones de contorno implicaron los ingresos y salidas de los caudales de los hidrogramas generados, para el posterior estudio del comportamiento del fluido en la modelación bidimensional.

Los escenarios del modelo bidimensional fueron generados frente a eventos de precipitación de corta duración y de gran intensidad, por lo que, se debería estudiar el comportamiento de los caudales ingresados frente a eventos de precipitación mucho mayores, es decir, considerando otros escenarios adicionales.

El costo computacional y la dimensión del mallado fueron factores notorios en la simulación, se podría haber obtenido resultados más precisos si el equipo de cómputo fuese más robusto y la malla mucho más fina, sin embargo, los resultados obtenidos son fiables por la calibración descrita en el artículo.

Mediante la construcción del mapa de riesgo de inundación se determinó que la zona con mayor afectación por inundación es la calle S29 y zonas aledañas, dado que, en todos los escenarios simulados este sector presenta niveles importantes de inundación.

Se presentan velocidades mayores, del orden de 4 a 6 m/s en el segundo tramo de la quebrada (calle 21 de agosto), por lo que se pueden presentar procesos erosivos.

Otra área que tiene alto riesgo de inundación es la aledaña a la calle 21 de agosto, presentando cotas de alcance de hasta 4 metros de altura.

Una vez analizados los escenarios desarrollados en la modelación bidimensional, se concluye que la presencia de los tramos embaulados provoca el desbordamiento en la entrada de cada una de estas estructuras, por lo que las dimensiones de las mismas no son adecuadas para descargar los caudales que se presentan en el cauce ante precipitaciones intensas.

Referencias

- [1] M. Blanco Chávez, “Metodología de Estudio Hidrológico para Elaborar Mapas de Amenazas por Inundación”, 2006.
- [2] W. Guachamín, F. García, M. Arteaga y J. Cadena, “Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación instituto nacional de meteorología e hidrología equipo técnico 2015 determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación”, 2015.
- [3] H. Flores, M. Roberto, y J. F. Enríquez-Quiroz, “Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México”, *Terra Latinoamericana*, 2009. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/scielo>
- [4] I. Ivan y O. Abad Encalada, “Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica”, Universidad de Cuenca, 2014.
- [5] M. Sanz-Ramos, L. Cea, y E. Bladé, “Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones”, 2022. Disponible en: <https://www.scipedia.com/public>
- [6] W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, “Mindestanforderungen

- an den Stauanlagenverantwortlichen von 'Kleinen Stauanlagen"', 2009.
- [7] J. Zambrano y Á. Espinoza, "Elaboración de mapas tipo atlas de las zonas de riesgo de inundación del sector urbano de Cuenca", 2013.
- [8] V. Te Chow, "Hidráulica de Canales abiertos". 1985.
- [9] A. G. Aguilar Alegria, "Modelación hidrológica de crecidas en la cuenca del río Machángara en la ciudad de Quito", 2010.
- [10] C. Dominguez, "CAUDALES", Quito, 2021.
- [11] L. Vargas Garay, O. D. Torres, y G. Carrillo, "Evaluación del modelo de hidrograma unitario SCS en la determinación de caudales máximos en cuencas de Norte de Santander", *Respuestas*, vol. 23, núm. 1, pp. 6–12, abr. 2018, disponible en: <https://dialnet.unirioja.es>
- [12] Ven Te Chow, "Hidrología Aplicada", 1994.
- [13] M. Villon, "Hidrología", 2004.
- [14] S. Havrylenko, F. Damiano, y M. Pizarro, "Estimación del número de curva en la cuenca del Río Arrecifes (Provincia de Buenos Aires)", *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 2006.
- [15] Greys Vargas Guajala, "Riesgo Físico Frente A Inundaciones Fluviales Y Pluviales En La Cabecera Parroquial Rocafuerte De", *Pontificia Universidad Católica Del Ecuador*", 2017.
- [16] M. Ramón, G. Blanquer, y J. Manuel, "Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica", Disponible en: <https://riunet.upv.es/>
- [17] J. Carlos y M. Rincón, "Análisis Del Ajuste, Sensibilidad E Incertidumbre De Los Parámetros Del Modelo Del SCS".
- [18] E. Ruiz, R. Miren, y M. Santos, "Hidrología Aplicada Tema 5. Escorrentía", Disponible en: <https://ocw.ehu.es/>
- [19] Y. Jumbo, "Estimación de la Tormenta de Diseño para Cuenca de Jatunhuaycu".
- [20] C. Bohórquez, "Modelación Numérica (CFD) Del Flujo Combinado Superior E Inferior En Una Compuerta Plana Con El Programa Flow-3d.", Quito, 2020.
- [21] A. Heredia, "Simulación De Flujos A Superficie Libre", Quito, 2023.
- [22] G. Collazos, "Uso Del Modelo Iber En Un Problema De Flujo Bidimensional", *Instituto de Hidrología de Llanuras*, pp. 2–5, 2015.