



**EVALUACIÓN DE DISTRIBUCIONES PROBABILÍSTICAS PARA PREDECIR
INUNDACIONES FLUVIALES DEL RÍO TUMBES, EN EL TRAMO DE LA CIUDAD
DE TUMBES, PERÚ**

**EVALUATION OF PROBABILISTIC DISTRIBUTIONS TO PREDICT FLUVIAL
FLOODING OF THE TUMBES RIVER, IN THE SECTION OF THE CITY OF TUMBES,
PERÚ**

*Consuelo Leyla, Sinforoso Chávez¹
Reymundo Jaulis Palomino²*

Recibido/received: 20-03-2024; aceptado/accepted: 29-abril-2024)

RESUMEN: El objetivo de la investigación, fue evaluar las distribuciones probabilísticas para predecir inundaciones fluviales del río Tumbes, en el tramo de la ciudad de Tumbes. La metodología aplicada en la recolección y análisis de los datos hidrometeorológicos, fue el análisis de frecuencia para los periodos de retorno de 50, 100 y 200 años, para obtener el hidrograma se trabajó con HEC-HMS, posteriormente se utilizó el modelo HEC-RAS, para representar la inundación para una avenida centenaria. La simulación se centró en el caudal de salida del punto de medición en la estación hidrométrica El Tigre, y se comparó con los valores medidos por el medidor de caudal. Se observó un error inferior al 1% al ajustar el parámetro del número de Curva. Los resultados del modelo HEC-RAS indican que se tiene una variación de 4.98% entre los valores mínimos y máximos en términos de tirantes. Mientras respecto a las velocidades del agua, se registra una variación del 11.36%, con valores que van desde 2.613 m/s hasta 2.910 m/s.

PALABRAS CLAVE: Datos hidrometeorológicos; HEC-HMS; HEC-RAS, cuenca.

¹ Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión – Perú, leyla.consuelo.2108@gmail.com

² Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión – Perú

ABSTRACT: The objective of the research was to evaluate the probabilistic distributions to predict fluvial flooding of the Tumbes River in the section of the city of Tumbes. The methodology applied in the collection and analysis of hydrometeorological data was the frequency analysis for return periods of 50, 100 and 200 years, to obtain the hydrograph we worked with HEC-HMS, then we used the HEC-RAS model to represent the flood for a centennial flood. The simulation focused on the outflow of the measuring point at the El Tigre hydrometric station, and was compared with the values measured by the flow meter. An error of less than 1% was observed when adjusting the Curve number parameter. The results of the HEC-RAS model indicate that there is a variation of 4.98% between the minimum and maximum values in terms of flow rates. Meanwhile, with respect to water velocities, a variation of 11.36% was recorded, with values ranging from 2.613 m/s to 2.910 m/s.

KEYWORDS: HEC-HMS; HEC-RAS; BASIN; Hydrometeorological Data.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales son consideradas como desastres destructivos y desbastadores, donde el hombre ha tenido que afrentarse a lo largo de los años. El Perú viene siendo afectado por el Fenómeno del Niño del Costero, producto al incremento de las temperaturas oceánicas que se presentan en el Norte del Perú. La ciudad más afectada es Tumbes, donde cada cierto periodo de lluvia genera desbordes en ambas riberas, afectando a la población, cultivos y estructuras existentes. La precisión de estas estimaciones no solo es crucial para evitar fallos en diversas estructuras, sino también porque las modificaciones posteriores a la construcción son costosas, especialmente si se determina que las estimaciones iniciales eran conservadoras (Huntington, 2006). La evaluación de inundaciones fluviales es crucial para aquellos involucrados en la gestión de ríos y áreas ribereñas, especialmente para aquellos dedicados a la prevención de inundaciones.

Debido a que no existe estudios de inundaciones fluviales, en base a diversas distribuciones probabilísticas en la ciudad de Tumbes, se procederá a relacionar dichas variables para que puedan trabajarse conjuntamente para futuros estudios hidrológicos, teniendo en cuenta que se podrá utilizarse para diferentes cuencas ubicadas en el territorio nacional de Perú. Siendo, un principal aporte para los consultores e investigadores, cuando se requiera realizar algún diseño de una estructura para mitigar los desbordamientos del flujo de agua en diferentes crecidas máximas.

La estimación del riesgo de inundación se proporciona en términos de descarga (m^3), pero puede convertirse a niveles de agua (m) y velocidad (m/s) mediante modelos hidráulicos (Norheim, 2018). La frecuencia de inundaciones se expresa comúnmente a través del "periodo de retorno" (TR), indicando que una inundación de cierta magnitud ocurrirá, en promedio, una vez cada T años. Dado que los registros de aforo para la mayoría de los ríos abarcan menos de 30 años, la extrapolación de las estimaciones de crecidas de diseño puede ser incierta y variar significativamente según el método utilizado (Nagy, 2017). El análisis de frecuencia de inundaciones (AFI) implica ajustar distribuciones de probabilidad a los datos observados, lo que facilita la estimación de los valores

de inundación de diseño para cualquier periodo de retorno deseado (Norheim, 2018).

Por lo tanto, esta investigación se centra en la estimación de inundaciones fluviales basada en distribuciones probabilísticas o de probabilidad, siendo representadas a través de un modelamiento hidrológico e hidráulico bidimensional para estimar las crecidas máximas en mapas de inundaciones fluviales para las diferentes distribuciones probabilísticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca hidrográfica del río Puyango-Tumbes abarca regiones limítrofes del departamento de Tumbes, al norte del Perú, así como provincias en el sureste de Ecuador, incluyendo Loja y El Oro. Su extensión total es de 4,850 km², siendo el 40% de esta área ubicada en territorio peruano. La red hidrográfica en su conjunto tiene una longitud de 950 km, con el tramo principal del río Puyango-Tumbes en su porción peruana alcanzando los 230 km. El río Tumbes mantiene un flujo constante de agua, con caudales mensuales promedio que varían entre 1244,2 y 7,7 m³/s, registrando una media de 116,3 m³/s según datos de la Estación El Tigre durante el período 1950 - 2023. Eventos climáticos como "El Niño" son recurrentes, presentando precipitaciones excepcionales en años como 1983, 1998 y 2017.

El río Tumbes al presentar periodos de precipitaciones y eventos climáticos como el "El Niño", ha generado inundaciones fluviales, siendo desbordamientos de agua temporales hacia las riberas que normalmente se encuentran secas. Por ello, al aplicar las distribuciones probabilísticas en el análisis de las inundaciones fluviales del río Tumbes, en el tramo de la ciudad de Tumbes, se obtendrá una estimación más precisa ante la ocurrencia de eventos de inundación, lo que permitirá predecir con mayor exactitud los niveles de crecida y contribuirá a una mejor gestión del riesgo en la zona.

La elección del tramo del río de estudio, se presentó en base a la disponibilidad de la información proporcionada por la Autoridad nacional del agua. Realizando recopilación documental de documentos relevantes de diversas plataformas de entidades públicas y privadas, como la Autoridad Nacional del Agua, proporcionando información de precipitaciones y caudales a escala diaria, como también la topografía levantada mediante Vuelo LIDAR. Los datos hidrometeorológicos y topográficos se detallan a continuación:

Datos hidrometeorológicos: Se utilizó datos de 8 estaciones que se encuentran involucrados en la cuenca del río de estudio a escala diaria, desde 1981 hasta 2023 en el Observatorio Nacional de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (<https://snirh.ana.gob.pe/VisorPorCuenca/>), y los caudales máximos instantáneos que fue proporcionada por el Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes.

Las estaciones pluviométricas involucradas en la cuenca del río Tumbes, cada una de ellas se encuentran detalladas según su longitud, latitud, periodo de data histórica y la escala en la que representan. Según la Tabla 1.

Tabla 1 Estaciones pluviométricas que involucran a la cuenca de estudio.

| ID | Nombre | Longitud | Latitud | Periodo | Escala |
|----|--------------------|----------|---------|------------|--------|
| 1 | Cabo Inga | -80.433 | -3.967 | 1981 -2023 | Diaria |
| 2 | Capitán Hoyle | -80.483 | -4.067 | 1981 -2023 | Diaria |
| 3 | Chacritas | -80.367 | -3.700 | 1981 -2023 | Diaria |
| 4 | Condor Flores | -80.148 | -3.885 | 1981 -2023 | Diaria |
| 5 | El Tigre | -80.459 | -3.764 | 1981 -2023 | Diaria |
| 6 | Huasimo | -80.504 | -3.998 | 1981 -2023 | Diaria |
| 7 | Quebrada Angostura | -80.400 | -3.767 | 1981 -2023 | Diaria |
| 8 | Rica Playa | -80.505 | -3.812 | 1981 -2023 | Diaria |

Datos Topográficos

Se trabajó con una topografía proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua, con una resolución de 5 metros, la cual tiene 45 kilómetros de longitud. Donde parte del sector Higuerón hasta la desembocadura del Océano Pacífico.

La metodología utilizada se subdividió en tres partes: 1) Realización del análisis de frecuencia para un periodo de retorno de 100 años. 2) Modelización hidrológica HEC-HMS 3) Modelización hidráulica HEC-RAS 2D.

Análisis de Frecuencia

El análisis de frecuencia permite estimar precipitaciones o caudales máximos según sea el estudio, para diferentes periodos de retorno a través de la aplicación de los modelos probabilísticos. Se utilizó el programa EasyFit para llevar a cabo el análisis de frecuencia, a través del ajuste automático de las distribuciones de probabilidad a los datos de la muestra para diferentes periodos de retorno y la selección al mejor modelo a través de la prueba de bondad de ajuste. Se recopiló los datos históricos de las estaciones pluviométricas para proceder a estimar los valores máximos anuales y realizar el análisis de frecuencia para los periodos de retorno (TR) de 50 años, 100 años y 200 años.

Definiendo el análisis para un periodo de retorno (TR) de 100 años, se destaca los otros periodos de retorno (TR) para comparar sus respectivos impactos en precipitaciones máximas. Las distribuciones probabilísticas aplicadas para los diferentes periodos de retorno figuran en la tabla 2.

Tabla 2 Distribuciones probabilísticas para cada TR

| N | Distribuciones Probabilísticas | Periodo de Retorno (TR) | | |
|----------|---------------------------------------|--------------------------------|----------|----------|
| 1 | Distribución Gumbel Max | 50 años | 100 años | 200 años |
| 2 | Distribución Normal | 50 años | 100 años | 200 años |
| 3 | Distribución Logarítmica Normal | 50 años | 100 años | 200 años |
| 4 | Distribución Logarítmica Normal 3P | 50 años | 100 años | 200 años |
| 5 | Distribución Log Pearson 3P | 50 años | 100 años | 200 años |

Modelo HEC-HMS

Se utilizó el programa HEC-HMS para la conversión de datos pluviométricos a flujo directo, considerando la topografía y las características superficiales del área modelada, como la longitud del tramo. El software incorporó factores como el enrutamiento, las pérdidas y la transformación del flujo en el cálculo de la escorrentía. Se verificaron los datos y se elaboró el modelo HEC-HMS, definiendo diversos parámetros específicos del software y generando archivos correspondientes a la cuenca y al modelo meteorológico. Los parámetros necesarios para ejecutar el modelo HEC-HMS figuran en la tabla 3.

Tabla 3 Parámetros necesarios para la ejecución del modelo HEC-HMS

| N | Modelo | Método | Parámetros requeridos |
|----------|-------------------------------|-------------------------|---|
| 1 | Parámetros de pérdidas | SCS Número de Curva | Abstracción Inicial (mm) y CN. |
| 2 | Transformación de escorrentía | SCS Hidrograma Unitario | Tiempo de retardo (min) |
| 3 | Método de Enrutamiento | Muskingum | Tiempo de viaje (k) y peso adimensional (X) |

Modelo HEC-RAS

HEC-RAS, permite realizar simulaciones de flujo estacionario 1D y cálculo de flujo no estacionario 1D y 2D, transporte de sedimentos/cálculos de lecho móvil. HEC-RAS 2D emplea ecuaciones de aguas para describir el movimiento del agua en términos de velocidad 2D promediada en profundidad del agua. El dominio del modelo se divide en celdas de malla, y HEC-RAS genera una tabla exhaustiva de propiedades hidráulicas para cada celda y cara de celda. Los perfiles de la superficie del agua resultantes del modelo mediante diversas características de diseño hidráulico, permiten a los encargados de la toma de decisiones asignar recursos de manera eficiente para la preparación ante eventos catastróficos, mejorando así la calidad de vida. Esto se logra al analizar la extensión de las inundaciones y las áreas afectadas. La confección de mapas de profundidad de inundación se llevó a cabo mediante Arc-GIS versión 10.5. Los parámetros necesarios para ejecutar el modelo HEC-RAS figuran en la tabla 4.

Tabla 4 Parámetros necesarios para la ejecución del modelo HEC-RAS

| N | Parámetros | Descripción | Escala |
|---|------------|-----------------------------------|---|
| 1 | Topografía | Modelo digital de elevación (DEM) | Resolución de 5 metros. |
| 2 | Hidrología | Hidrograma unitario | Escala temporal de 15 minutos (m ³ /s) |
| 3 | Hidráulica | Condiciones de flujo | Fujo no estacionario |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso inicia en considerar las estaciones ubicadas dentro de la cuenca de Tumbes, donde abarcan el periodo de 1981 a 2023 a escala diaria. Se procede a estimar los valores máximos anuales para llevar a cabo el análisis de frecuencia. Este análisis permite visualizar cómo se comportan a lo largo de los años los datos de las 8 estaciones que están siendo evaluadas. Las series de precipitaciones máximas de 24 horas se encuentra mostrado en la figura 1.

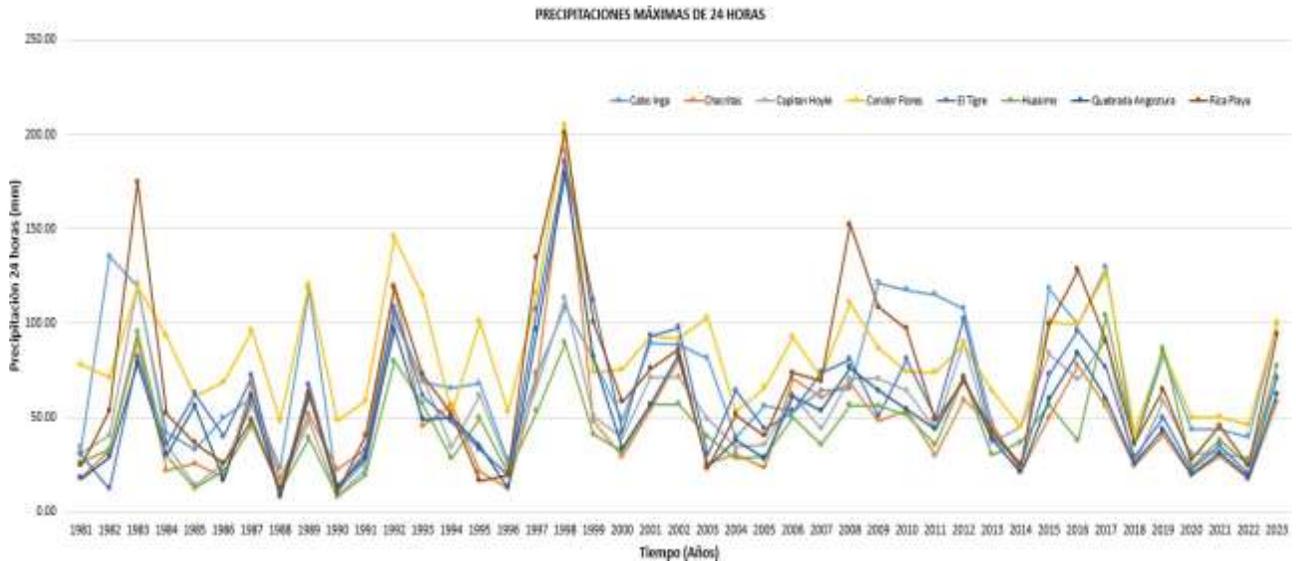


Figura 1. Series de precipitaciones máximas de 24 horas.

Para ello, se tuvo que considerar la representatividad, calidad, extensión y consistencia de la data histórica con un mínimo de 25 años de registro para predecir los eventos futuros con resultados confiables, siendo consideradas también dentro de la data histórica eventos del Fenómeno “El Niño”. Caso contrario, se obtendría incompatibilidad en la predicción de eventos futuros afectando a la gestión de riesgos de inundaciones fluviales y al diseño de una estructura lateral para mitigar

desbordamientos. Las precipitaciones máximas anuales para cada distribución figuran en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 5 Precipitaciones para un TR 50 años para cada distribución probabilística

| Estación / Distribución | Gumbel Max | Normal | Log Normal | Log Normal 3P | Log Pearson 3P |
|--------------------------------|-------------------|---------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Cabo Inga | 160.94 | 142.29 | 199.08 | 155.97 | 159.65 |
| Capitán Hoyle | 121.27 | 106.98 | 147.48 | 120.23 | 116.31 |
| Chacritas | 131.65 | 114.15 | 132.62 | 153.68 | 146.21 |
| Condor Flores | 166.56 | 149.42 | 162.96 | 177.75 | 170.47 |
| El Tigre | 149.32 | 130.53 | 187.75 | 154.01 | 150.83 |
| Huasimo | 104.07 | 91.693 | 120.19 | 105.38 | 102.61 |
| Quebrada Angostura | 131.06 | 114.24 | 154.04 | 137.15 | 134.92 |
| Rica Playa | 181.71 | 157.91 | 226.56 | 204.13 | 198.15 |

Tabla 6 Precipitaciones para un TR 100 años para cada distribución probabilística

| Estación / Distribución | Gumbel Max | Normal | Log Normal | Log Normal 3P | Log Pearson 3P |
|--------------------------------|-------------------|---------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Cabo Inga | 179.79 | 151.73 | 232.51 | 171.20 | 172.88 |
| Capitán Hoyle | 135.71 | 114.22 | 172.39 | 133.61 | 125.46 |
| Chacritas | 149.33 | 123.01 | 155.69 | 188.09 | 177.58 |
| Condor Flores | 183.88 | 158.09 | 179.44 | 201.15 | 190.55 |
| El Tigre | 168.32 | 140.04 | 224.56 | 175.47 | 167.07 |
| Huasimo | 116.57 | 97.96 | 139.67 | 118.43 | 112.67 |
| Quebrada Angostura | 148.05 | 122.75 | 183.28 | 158.47 | 152.77 |
| Rica Playa | 205.76 | 169.95 | 274.21 | 240.76 | 227.99 |

Tabla 7 Precipitaciones para un TR 200 años para cada distribución probabilística

| Estación / Distribución | Gumbel Max | Normal | Log Normal | Log Normal 3P | Log Pearson 3P |
|--------------------------------|-------------------|---------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Cabo Inga | 223.36 | 170.84 | 318.37 | 205.09 | 198.56 |
| Capitán Hoyle | 169.08 | 128.85 | 236.46 | 164.41 | 142.83 |
| Chacritas | 190.21 | 140.94 | 215.41 | 284.70 | 266.61 |
| Condor Flores | 223.93 | 175.66 | 218.07 | 259.93 | 240.07 |
| El Tigre | 212.22 | 159.29 | 322.64 | 227.28 | 200.56 |
| Huasimo | 145.47 | 110.63 | 189.31 | 149.35 | 133.65 |
| Quebrada Angostura | 187.33 | 139.98 | 260.56 | 211.59 | 193.09 |
| Rica Playa | 261.36 | 194.34 | 403.55 | 335.38 | 297.46 |

La selección de la distribución más adecuada se llevó a cabo mediante pruebas de bondad de ajuste. Se ha determinado que la información pluviométrica se ajusta de manera óptima a la distribución Logarítmica Normal. Es relevante señalar que, aunque la distribución Logarítmica Normal exhibe un ajuste superior, se consideran otras distribuciones con el fin de evaluar las correspondientes manchas de inundación. El comportamiento de las distribuciones probabilísticas para un periodo de retorno (TR) de 100 años de cada estación meteorológica se visualiza en la figura 2.

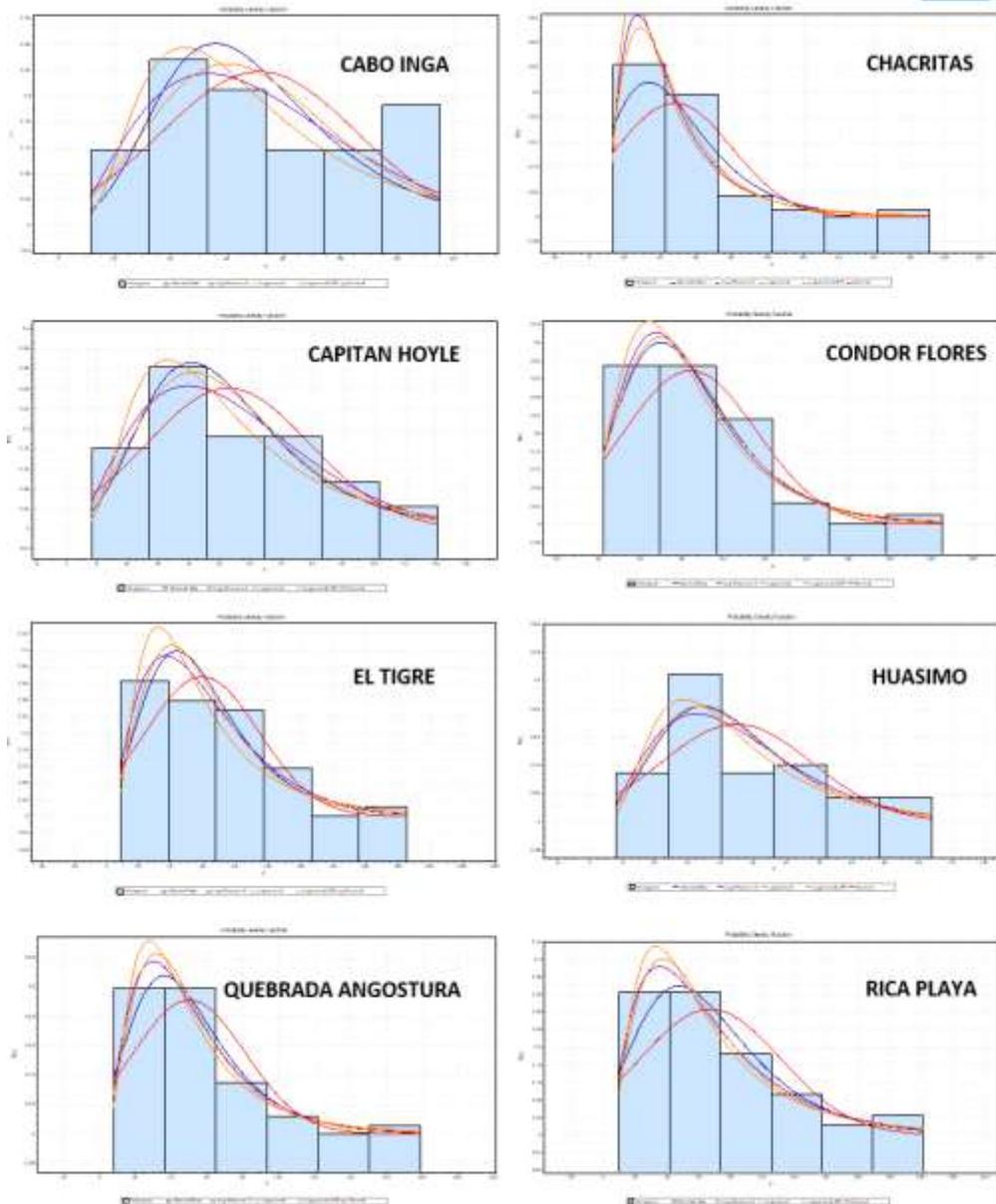


Figura 2. Distribuciones probabilísticas para las estaciones meteorológicas

Modelización Hidrológica HEC-HMS

El MDE es un insumo esencial para definir la topografía y la delimitación de la cuenca sobre la base del semi-MDE mostrado en la figura 3.

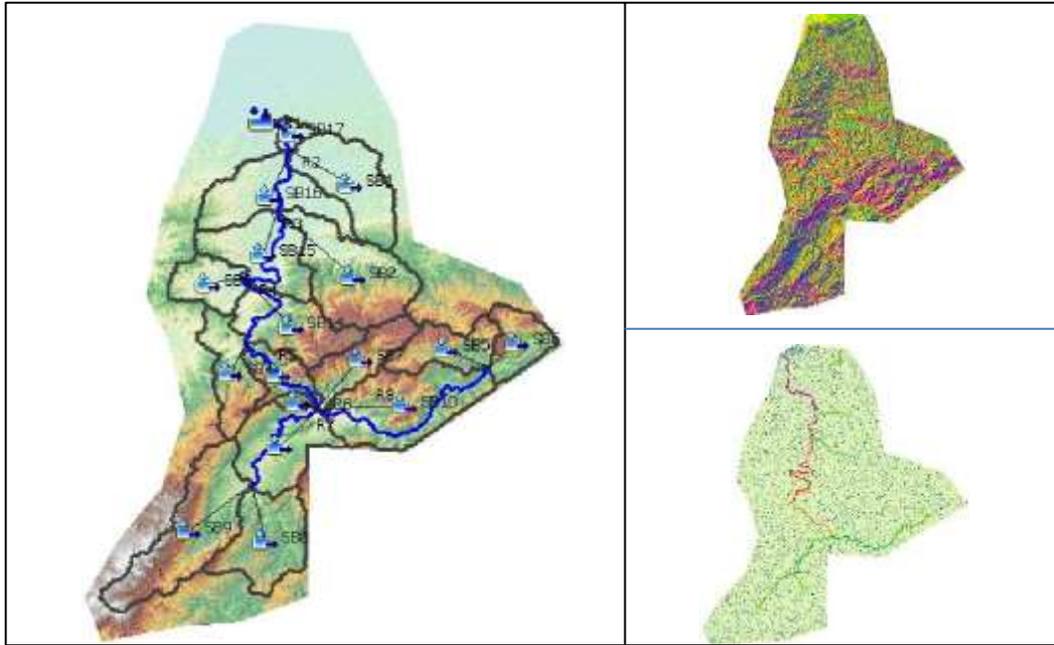


Figura 3. Esquema del modelo agrupado

El mapa de suelos y los conjuntos de datos de uso del suelo se utilizaron para generar el archivo de cuadrícula del Número de Curva (CN), necesario para construir el modelo HEC-HMS. Los modelos de pérdidas en HEC-HMS se calcularon restando el volumen de agua interceptada, infiltrada, almacenada, evaporada o transpirada al volumen de agua (Tassew et.al.,2019). Para calcular la escorrentía directa a partir de una precipitación de diseño se utilizó el método de pérdidas del número de curva del Servicio de Conservación del Suelo (SCS Curva Número).

Para el modelo de pérdidas, el SCS-CN tiene dos parámetros: el número de curva (CN) y la abstracción inicial (Ia). El coeficiente de abstracción inicial por defecto era igual a 0,2, pero se varió después de la calibración del modelo (Tassew et.al.,2019). El CN es una función del uso del suelo y del tipo de suelo estimada mediante el conjunto de herramientas HEC-HMS. El porcentaje de impermeabilidad para cada subcuenca se asumió como 0% (se asumió que toda la cuenca era completamente permeable).

$$CN = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Donde A_i es la superficie (km^2) de la subcuenca y CN_i es el número de curva correspondiente.

Ia (mm) se obtiene multiplicando el coeficiente de pérdida por la abstracción potencial S (mm). La abstracción potencial es función de CN y se calcula mediante la fórmula.

$$S = \frac{25,400}{CN} \quad (2)$$

Donde S es la abstracción potencial y CN es el número de curva correspondiente.

Los modelos de predicción de transformación en HEC-HMS simulan el proceso de escorrentía directa del exceso de precipitación en la cuenca y transforman el exceso de precipitación en

escorrentía puntual. Durante el análisis de los datos del estudio, se utilizó el modelo del Hidrograma Unitario SCS para transformar el exceso de precipitación en escorrentía. Los valores del parámetro de tiempo de desfase de la cuenca se determinaron durante el procesamiento de datos utilizando la herramienta HECHMS y se registraron en la tabla de atributos de la capa de datos de la subcuenca. Inicialmente, los tiempos de retardo de la cuenca se calcularon en horas para las subcuencas mediante la ecuación (3) y se convirtieron a minutos cuando se emplearon con HEC-HMS.

$$Lag = 0.60 * T_c \quad (3)$$

Donde: Lag es el tiempo de retardo de la cuenca y t_c = tiempo de concentración (hora). Los valores de los parámetros necesarios del modelo de la cuenca figuran en la Tabla 8.

Tabla 8 Parámetros del modelo cuenca

| No | Área de cuenca (Km ²) | CN | Abstracción Inicial (mm) | Tiempo de retardo |
|----|-----------------------------------|-------|--------------------------|-------------------|
| 1 | 138.90 | 68.22 | 20.87 | 224.12 |
| 2 | 187.75 | 67.58 | 21.56 | 165.98 |
| 3 | 67.739 | 48.85 | 49.29 | 139.69 |
| 4 | 89.922 | 62.95 | 26.88 | 117.01 |
| 5 | 84.581 | 67.70 | 21.43 | 102.92 |
| 6 | 67.447 | 70.06 | 18.99 | 84.39 |
| 7 | 81.993 | 67.56 | 21.58 | 112.74 |
| 8 | 136.00 | 67.38 | 21.77 | 131.18 |
| 9 | 204.90 | 67.38 | 21.77 | 155.67 |
| 10 | 196.41 | 70.62 | 18.44 | 136.79 |
| 11 | 132.66 | 67.41 | 21.74 | 135.40 |
| 12 | 10.796 | 68.13 | 20.97 | 105.00 |
| 13 | 57.960 | 67.38 | 21.77 | 73.80 |
| 14 | 123.46 | 67.38 | 21.77 | 126.09 |
| 15 | 128.25 | 64.30 | 25.25 | 170.24 |
| 16 | 140.55 | 55.85 | 36.75 | 246.49 |
| 17 | 19.458 | 62.34 | 27.64 | 139.80 |

Método de enrutamiento Muskingum

A medida que la escorrentía de la crecida se desplaza por el tramo del canal, se debilita debido a los efectos de almacenamiento del canal. El modelo de enrutamiento disponible en el software HEC-HMS para este escenario fue el método Muskingum (Din & Khan, 2019).

El método Muskingum es una técnica común de enrutamiento de flujos agrupado. En este modelo, se requirió dos parámetros, X y K. Donde X es un peso adimensional, que varía entre 0 y 0,5, donde K es un factor que representa la influencia relativa del caudal en los niveles de almacenamiento. Es posible asumir que el valor inicial de los parámetros de calibración es 0.1, el

lcual fue ajustado durante el proceso de calibración. El parámetro K, que tiene unidades de tiempo y varía entre 1 y 5 horas, está asociado con el retraso entre los picos de descarga, según lo indicado por Din y Khan (2019). La estimación de K se realiza mediante la ecuación (4).

$$K = \frac{L}{V_w} \quad (4)$$

Donde: V_w es la velocidad de la onda de crecida, que puede tomarse como 1,5 veces la velocidad media y L es la longitud del tramo. La velocidad media se obtuvo a partir de los puntos de aforo de los arroyos. El valor de K se utilizó también en el proceso de calibración dentro de límites cortos basados en la Ecuación (4) hasta que los hidrogramas simulados se aproximaron a los observados.

Se llevaron a cabo simulaciones de los procesos de escorrentía pluvial en sistemas de cuencas dendríticas mediante la aplicación del sistema de modelización hidrológica HEC-HMS. Tras realizar el preprocesamiento en el HEC-HMS, el modelo se incorporó al software como un archivo de cuenca. La Figura 3 ilustra el archivo del modelo de cuenca.

Los parámetros derivados, tales como los relacionados con las pérdidas (como el número de curva, la abstracción inicial y el porcentaje de impermeabilidad), los vinculados a la transformación (como el tiempo de retardo), y los asociados al encaminamiento (k y x), fueron incorporados a las subcuencas y a los tramos, ya sea de forma manual o automática, utilizando la información contenida en las tablas de atributos del modelo. La correcta entrada de datos en el HEC-HMS es crucial para la ejecución exitosa de la modelización de lluvia-escorrentía.

Las series temporales de datos de precipitación y descarga se incorporaron mediante el gestor de datos de series temporales. Se generaron archivos destinados a la entrada de datos de precipitación en la carpeta, abarcando los intervalos de los años hidrológicos 1981-2023. En cuanto al control de las precipitaciones diarias, estas iniciaron el 29 de octubre a las 00:00 horas y concluyeron el 30 de octubre a las 00:00 horas, con un intervalo de tiempo establecido en pasos de 30 minutos.

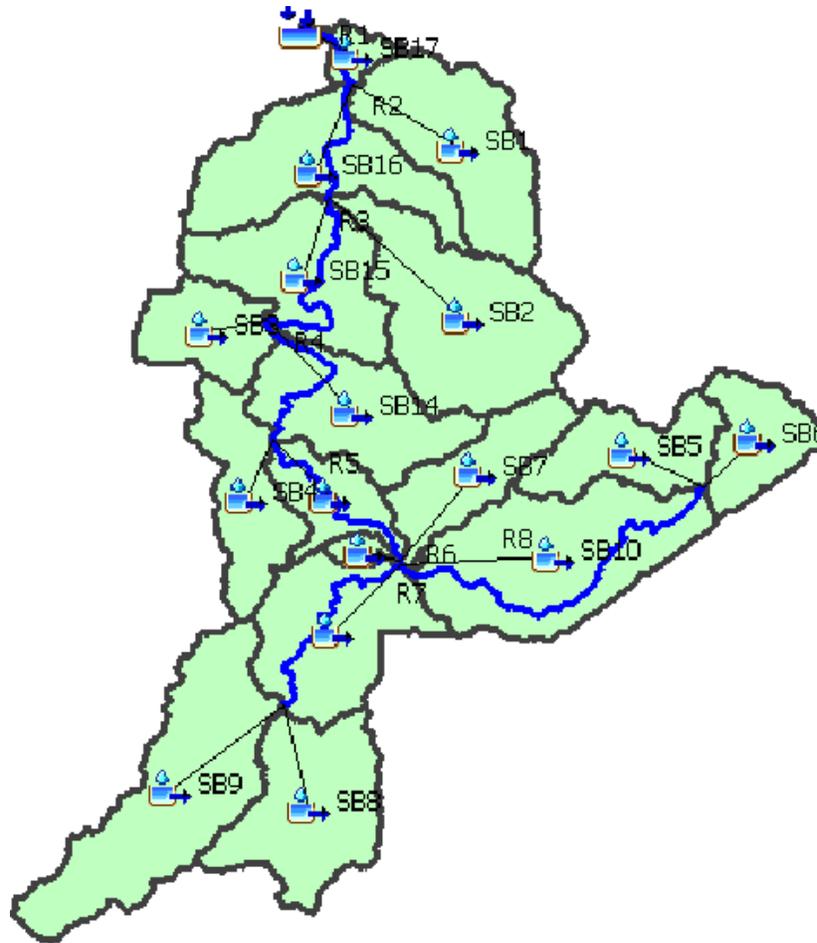


Figura 3. Archivo del modelo de cuenca

Calibración del modelo HEC-HMS

El parámetro más sensible en el modelo HEC-HMS es el Número de Curva, este valor correspondiente al área de estudio es obtenido mediante procesos de calibración. La calibración del parámetro del Número de Curva se realizó con la información de campo, de los eventos de los datos de caudales resultantes, procediendo a realizar nuevamente la simulación en el modelo HEC-HMS hasta ajustar el hidrograma calculado con el hidrograma observado en campo. Actuando como una prueba de error en donde se ajusta el parámetro del Número de Curva hasta tener coincidencias entre ambos hidrogramas.

La calibración se llevó a cabo utilizando el periodo de retorno de 100 años y se centró en el pico del caudal observado en la estación hidrométrica Puente Tumbes. La distribución probabilística que mejor se ajustó fue la Logarítmica Normal, y los resultados simulados fueron obtenidos mediante el modelo HEC-HMS. Se observó que al reducir el Valor de la Curva (CN), se aproximaba al valor deseado, con un error inferior al 1%. La validación del modelo, variando el Número de Curva figuran en la Tabla 9.

Tabla 9. Validación del modelo, variando el Número de Curva

| SUBCUENCA | CN | -1% | -1% | -1% | -0.01% |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| SB1 | 70.88 | 70.17 | 69.47 | 68.77 | 68.22 |
| SB2 | 70.21 | 69.51 | 68.81 | 68.12 | 67.58 |
| SB3 | 50.75 | 50.24 | 49.74 | 49.24 | 48.85 |
| SB4 | 65.40 | 64.75 | 64.10 | 63.46 | 62.95 |
| SB5 | 70.33 | 69.63 | 68.93 | 68.24 | 67.70 |
| SB6 | 72.79 | 72.06 | 71.34 | 70.63 | 70.06 |
| SB7 | 70.19 | 69.49 | 68.79 | 68.11 | 67.56 |
| SB8 | 70.00 | 69.30 | 68.61 | 67.92 | 67.38 |
| SB9 | 70.00 | 69.30 | 68.61 | 67.92 | 67.38 |
| SB10 | 73.37 | 72.64 | 71.91 | 71.19 | 70.62 |
| SB11 | 70.03 | 69.33 | 68.64 | 67.95 | 67.41 |
| SB12 | 70.78 | 70.07 | 69.37 | 68.68 | 68.13 |
| SB13 | 70.00 | 69.30 | 68.61 | 67.92 | 67.38 |
| SB14 | 70.00 | 69.30 | 68.61 | 67.92 | 67.38 |
| SB15 | 66.80 | 66.13 | 65.47 | 64.82 | 64.30 |
| SB16 | 58.02 | 57.44 | 56.87 | 56.30 | 55.85 |
| SB17 | 64.77 | 64.12 | 63.48 | 62.85 | 62.34 |
| Q simulado | 3462.00 | 3405.70 | 3350.60 | 3296.60 | 3254.40 |
| Q observado | 3251.40 | 3251.40 | 3251.40 | 3251.40 | 3251.40 |
| error (%) | 6.48% | 4.75% | 3.05% | 1.39% | 0.09% |

Caudales máximos para diferentes distribuciones probabilísticas

En la presentación de la tabla que muestra los valores máximos de caudal para un periodo de retorno de 100 años, se destacan los resultados obtenidos mediante el análisis de cinco distribuciones diferentes. La disposición de la tabla facilita la comparación entre las diferentes distribuciones y sus respectivos impactos en los caudales máximos esperados.

Esta presentación proporciona una visión clara y concisa de cómo las distintas distribuciones afectan la estimación de valores extremos de caudal para el periodo de retorno seleccionado. Los caudales para diversos periodos de retorno de cada distribución probabilística figuran en la tabla 10.

Tabla 10. Caudales para diversos periodos de retorno para cada distribución probabilística

| Estación | Gumbel Max | Normal | Log Normal | Log Normal 3P | Log Pearson 3P |
|-------------|------------|---------|------------|---------------|----------------|
| TR 50 AÑOS | 3455.40 | 3042.30 | 3956.10 | 3770.70 | 3695.90 |
| TR 100 AÑOS | 3873.10 | 3251.40 | 4599.30 | 4327.00 | 4179.90 |
| TR 200 AÑOS | 4838.20 | 3674.80 | 5279.20 | 5706.60 | 4664.20 |

Modelización hidrodinámica con HEC-RAS 2D

En el contexto de la modelización utilizando HEC-RAS, se abordó un enfoque por etapas con una batimetría de resolución de 10 metros. En la primera fase (1), se importó la batimetría y se georreferenció en la proyección 17S. La segunda etapa (2) implicó la generación del dominio y la malla computacional con una resolución específica. En la tercera fase (3), se llevó a cabo la simulación utilizando un hidrograma con un intervalo de 30 minutos y condiciones normales de aguas bajas. La última etapa, la cuarta (4), consistió en la incorporación de un mapa satelital para completar el proceso. Donde se visualiza en la Figura 4.

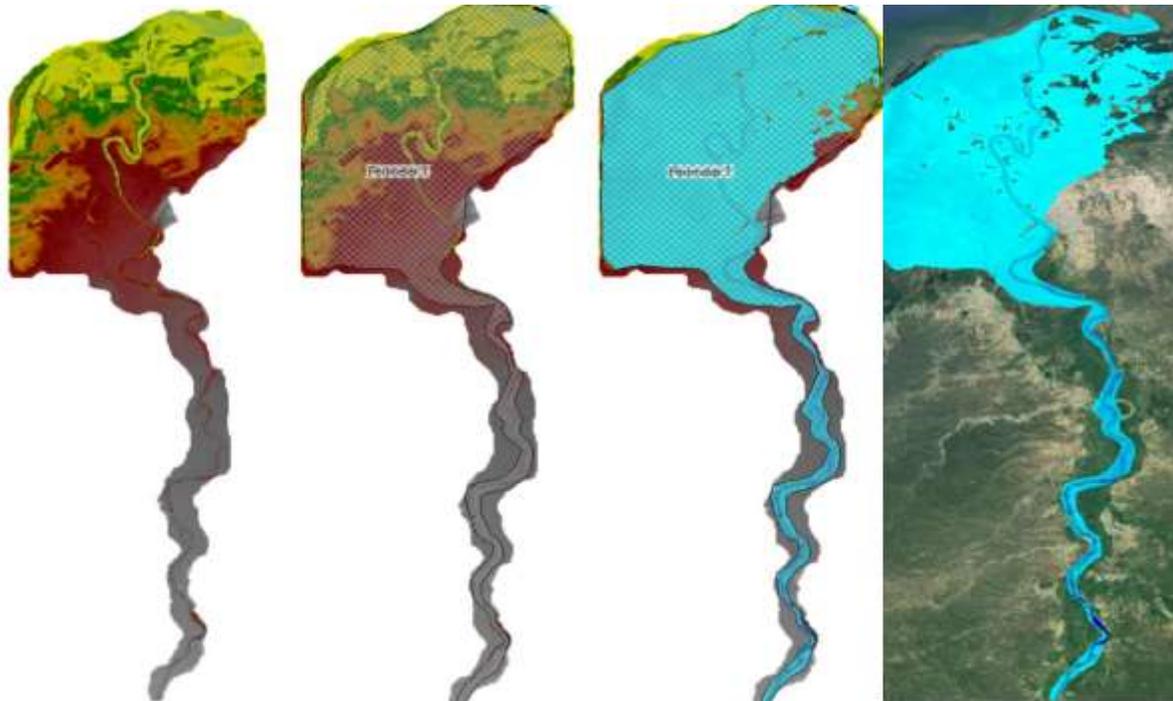


Figura 4. Proceso de modelización con HEC-RAS

Es posible llevar a cabo la evaluación en múltiples puntos a lo largo del tramo, específicamente en la ciudad de Tumbes. En este escenario, se puede establecer secciones transversales para comparar las velocidades y tirantes en términos de distribuciones probabilísticas diversas. Diversas investigaciones, como la realizada por (Chanjin & Dong, 2023), subrayan la importancia de evaluar el periodo de retorno asociado a desbordes fluviales. En este contexto, se ha observado que, para un periodo de retorno de 100 años, se registran desbordes en ambas riberas. El proceso de modelización con HEC-RAS 2D se visualiza en la Figura 5.

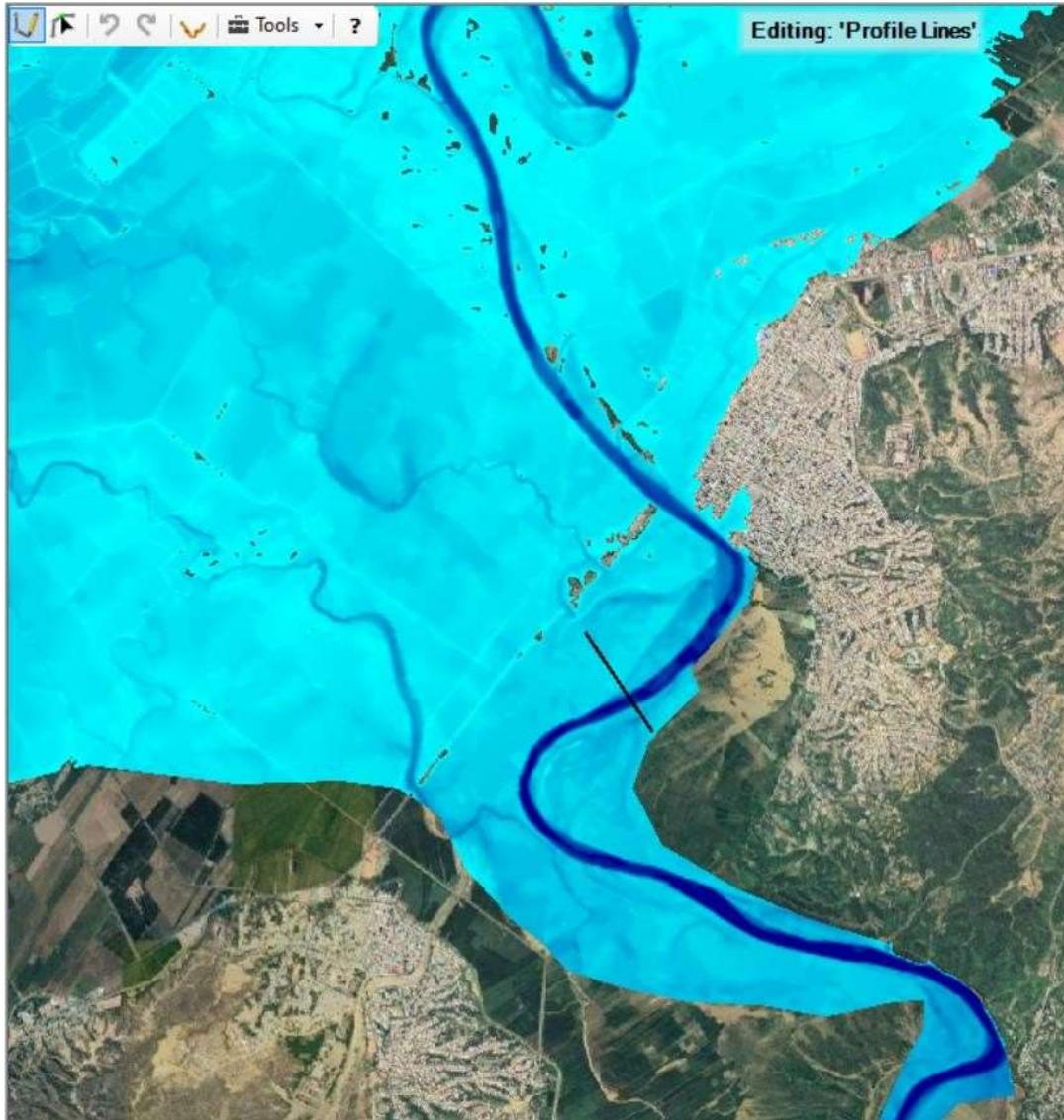


Figura 5. Proceso de modelización con HEC-RAS

La evaluación en el modelo hidrodinámico HEC-RAS 2D en términos de tirantes y velocidades, se muestra en la Figura 6 y Figura 7.

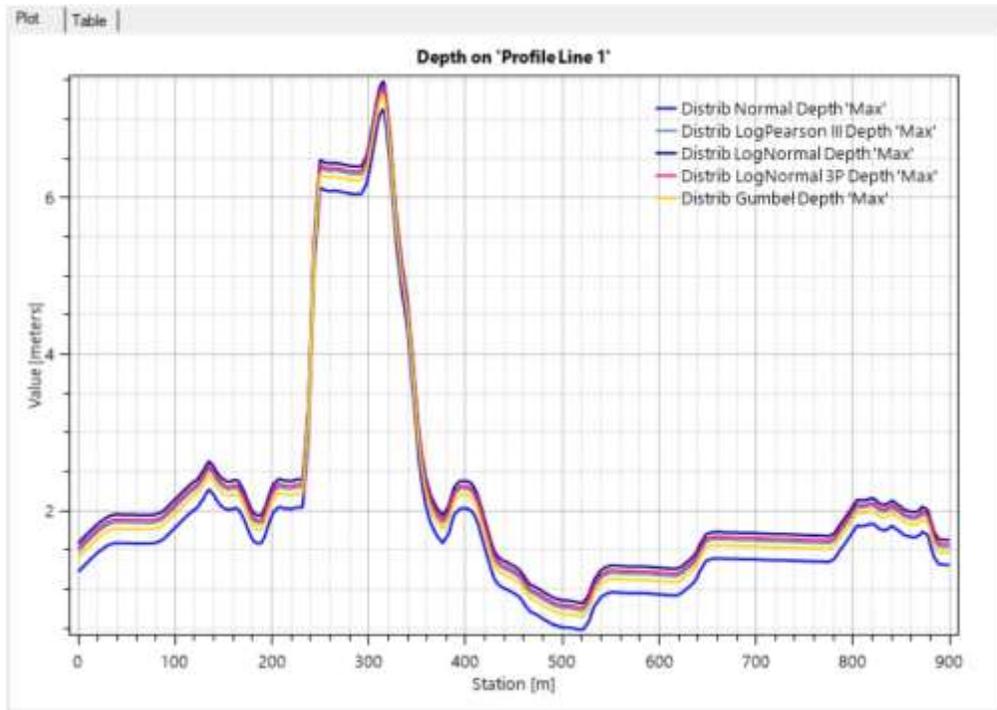


Figura 6. Proceso de modelización con HEC-RAS 2D

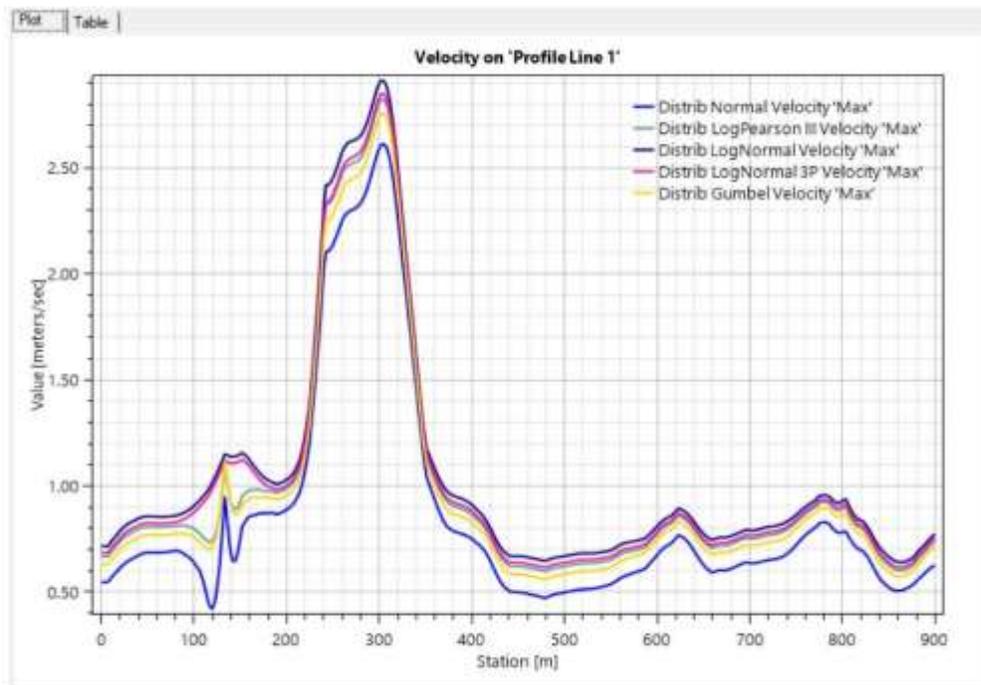


Figura 7. Proceso de modelización con HEC-RAS 2D

En relación con los tirantes, se observan intervalos que van desde un mínimo de 7.129 m en el caso de la distribución normal hasta un máximo de 7.484 m para la distribución logarítmica normal. Esto implica una variación porcentual de 4.98% entre el valor mínimo y máximo. En cuanto a las velocidades, se registran valores que oscilan entre 2.613 y 2.910 para las distribuciones normal y logarítmica normal, con una variación del 11.36% entre el valor mínimo y máximo.

Es importante destacar que las estaciones meteorológicas se ajustan a las distribuciones logarítmica normal. La distribución Normal, presenta el menor valor en comparación con otras distribuciones. Esto implica que la distribución Logarítmica Normal, al ser la que mejor se ajusta durante la prueba de bondad de ajuste, genera valores superiores en términos de tirantes y velocidades en el contexto de desbordes fluviales.

Este análisis técnico respalda la elección de la distribución Logarítmica Normal como la más adecuada para modelar el comportamiento hidrológico, destacando su capacidad para representar de manera más precisa los eventos extremos asociados a inundaciones, se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Tirantes y velocidades para cada distribución probabilística

| Parámetros | Gumbel Max | Norma I | Log Normal | Log Normal 3P | Log Pearson 3P |
|-------------|------------|---------|------------|---------------|----------------|
| Tirantes | 7.305 | 7.129 | 7.484 | 7.420 | 7.384 |
| Velocidades | 2.757 | 2.613 | 2.910 | 2.849 | 2.822 |

La investigación de Muñoz y Quinde (2021), se afirma que las regiones con niveles considerables de inundación, ya sea de moderada o alta intensidad, representan un riesgo potencial para la seguridad de las personas, complicando las tareas de evacuación. Esta complejidad surge cuando la profundidad del agua alcanza al menos 0.3 m y la velocidad del flujo alcanza los 5 m/s.

En las áreas cercanas a la ciudad de Tumbes, los valores en términos de tirantes son superados. Por consiguiente, al modelar las áreas de inundación y sus parámetros hidráulicos, se abre la posibilidad de proyectar diversas estructuras de protección lateral. Este enfoque se basa en estudios preliminares que han estimado el caudal de diseño de manera que se pueda ofrecer una protección adecuada.

CONCLUSIONES

Se empleó el modelo hidrológico HEC-HMS con el propósito de determinar el caudal mediante simulaciones de lluvia-escorrentía. La simulación se centró en el caudal de salida del punto de medición en la estación hidrométrica El Tigre, y se comparó con los valores medidos por el medidor de caudal. Se observó un error inferior al 1% al ajustar el parámetro del número de Curva. Donde se concluye lo siguiente relacionado al modelo HEC-HMS.

- Los resultados de simulación de los picos de descarga de escorrentía son ligeramente diferentes en comparación con los datos observados.
- La zona de interés no cuenta con una estación de descarga disponible distinta de la situada cerca a la parte alta, que podría ayudar a validar la escorrentía de dichas zonas para mayor aproximación en la representación de la cuenca.
- Durante la modelización con HEC-HMS, se observó que los principales parámetros que afectan a las cantidades de escorrentía eran el número de curva y luego la abstracción inicial. Por ello, se tienen que considerar el correcto ingreso de los parámetros al modelo y así evitar una incoherencia en la simulación en la modelización HEC-HMS.

Se utilizó el modelo HEC-RAS para representar las áreas inundadas, y los resultados indican lo siguiente, en términos de tirantes de agua, se observa una variación de 4.98% entre los valores mínimos y máximos, con un mínimo de 7.129 metros en la distribución normal y un máximo de 7.484 metros en la distribución logarítmica normal. Respecto a las velocidades del agua, se registra una variación del 11.36%, con valores que van desde 2.613 m/s hasta 2.910 m/s para las distribuciones normal y logarítmica normal, respectivamente.

- Los resultados de la simulación hidrodinámica que muestra las áreas inundadas se visualizan a través del RAS Mapper incorporado en el software. Además, se destaca que la batimetría recopilada coincide con la extensión de inundación registrada en el año 2017.
- Los resultados de la simulación proporcionan una información valiosa para la gestión de inundaciones, permitiendo una mejor comprensión de los riesgos de inundación y ayudando en la toma de decisiones relacionadas con la planificación urbana, la mitigación de riesgos y el diseño de infraestructura de control de inundaciones.
- El hidrograma de entrada fue generado mediante el uso del modelo HEC-HMS. La duración total de este hidrograma se basa en la finalización de la tormenta, con un periodo adicional que permite que toda la lluvia alcance el punto de medición. Esta estrategia asegura que el hidrograma del tramo se complete hasta el punto donde ocurre la deflexión en la curva de descenso.
- Se aplicó el método del flotador en la calibración del modelo para obtener datos de velocidades y tirantes. El objetivo era determinar de manera precisa el valor del coeficiente de rugosidad de Manning para el modelo, y se obtuvo el valor de 0.039.

REFERENCIA

Chanjin, J.; Dong, K.; 2023. Selection of Elevation Models for Flood Inundation Map Generation in Small Urban Stream: Case Study of Anyang Stream. China.

Din, S.; & Khan, N.; 2019. Runoff modelling using HEC HMS for rural watershed. Development.

Driouech, F.; & Mahé, G.; 2010. Evaluation d'impacts potentiels of changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc. Water Science and Application.

- Duan, Q.; & Gupta, H.; 2003. Calibration of Watershed Models. Water Science and Application.
- Hadour, A.; & Mahé, G.; 2020. Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. Journal of Hydrology.
- Hernández, R.; 2014. Metodología de la investigación. México: Interamericana Editores.
- Huntington, T.; 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. Journal of Hydrology.
- McCarthy, G.; 1939. The unit hydrograph and flood routing. In Proceedings of the Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, New London. USA.
- Muñoz, H.; & Quinde, F.; 2021. Modelamiento Hidrológico e Hidráulico de la Quebrada San Idelfonso para localizar áreas de inundación en Trujillo utilizando HEC-HMS y HEC-RAS. Lima
- Nagy, B.; 2017. Flood frequency analysis for a braided river catchment in New Zealand: Comparing annual maximum and partial duration series with varying record lengths. Journal of Hydrology.
- Norheim, S.; 2018. Flood frequency analysis: Comparing annual maximum series and peak over threshold. Sogndal.
- Palomino, J.; 2022. Estimación de los caudales medios mensuales de la cuenca alta del Huallaga aplicando un modelo hidrológico racional con imágenes satelitales. Lima.
- Tassew, B.; & Belete, M.; 2019. Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, upper Blue Nile basin. Ethiopia.
- Youssef, H.; & Simonneaux, V.; 2018. Modélisation pluie-débit et analyse du régime d'un bassin versant semi-aride sous influence nivale. Cas du bassin versant du Rheraya. Agro- hydrology in semi-arid areas, pp. 49-62.

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Consuelo Leyla, Sinforoso Chávez. Pertenece al Programa de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión – Perú.

<https://orcid.org/0009-0008-6735-140X>



Reymundo Jaulis Palomino. Pertenece al Programa de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión – Perú.

<https://orcid.org/0000-0003-1330-2801>