

**Herramientas Computacionales Avanzadas Para El Análisis de Fenómenos Hídricos
Mediante La Modelación Hidráulica Bidimensional**

Daniel Fernando Vargas Cortez

Facultad De Ingenierías Y Arquitectura

Universidad De Pamplona

Programa De Ingeniería Civil

Ing. Diego Ivan Sánchez Tapiero

Pamplona, Colombia

Junio 2025

Tabla de Contenido

Introducción	5
1. Modelación Hidráulica	6
1.1. Historia de la Modelación Hidráulica y su Evolución Histórica	6
1.2. Fundamentos Teóricos y su Evolución	7
2. Ecuaciones de Gobierno que Rigen los Flujos Bidimensionales	9
2.1. Ecuaciones de Gobierno	10
2.2.1. Ecuaciones de Navier-Stokes	11
2.2.1.1. Conservación de la Masa (continuidad)	11
2.2.1.2. Conservación del Momento (Segunda Ley de Newton)	12
2.2.1.3. Formulación Vectorial y Tensorial	13
2.2.1.4. Ecuaciones Derivadas y Simplificaciones.	14
2.2.1.5. Ecuación de Stokes	15
2.2. Ecuaciones de Aguas Someras	16
2.2.1.1. Hipótesis de la Presión Hidrostática	17
2.2.1.2. Velocidad Vertical Despreciable	18
2.2.1.3. Ecuación de Momento Horizontal.	19
2.2.2. Ecuaciones de Saint-Venant	20
2.2.2.1. Ecuación de Continuidad.	21
2.3. Limitación de las Ecuaciones de Gobierno	22

2.4.	Modelos de Propagación de Ondas	26
2.5.	Métodos Numéricos	30
3.	Herramientas Computacionales para la Modelación Hidráulica.....	34
3.1.	Clasificación de los Modelos Hidráulicos	34
3.2.	Principales Características de las Herramientas Computacionales	35
3.3.	Tendencias y Avances en la Tectología de la Modelación.....	37
3.4.	Herramientas HEC-RAS e IBER para la Modelación Hidráulica	38
3.4.1.	HEC-RAS	39
3.4.2.	IBER	41
4.	Aplicación de las Herramientas Computacionales HEC-RAS e IBER.....	44
5.	Conclusiones	58
6.	Recomendaciones	61
	Referencias.....	62

Lista de Figuras

Figura 1	Interfaz gráfica de HEC-RAS con resultados de simulación 2D	41
Figura 2	Interfaz gráfica de IBER.....	43
Figura 3	Modelo digital del terreno (MDT) mostrado en 3D con sombreado topográfico - Parte 1	45
Figura 4	Modelo digital del terreno (MDT) mostrado en 3D con sombreado topográfico - Parte 2	45
Figura 5	Definición de condiciones de contorno en un área de flujo 2D dentro de HEC-RAS .	47
Figura 6	Simulación de estructuras hidráulicas, como puentes o compuertas, en áreas de flujo 2D	48
Figura 7	Visualización en RAS Mapper de velocidades del agua	50
Figura 8	Visualización en RAS Mapper de calados con traza de partículas	50
Figura 9	Visualización en el módulo de postproceso de IBER	54

Introducción

A través del tiempo la ingeniería civil ha tenido grandes avances gracias a la tecnología, tal que el uso de las herramientas digitales tiene una gran relevancia en el análisis y la planificación de obras hidráulicas. Una de las técnicas más utilizadas en este campo es la modelación hidráulica, la cual nos permite simular su comportamiento que tiene el agua en distintos escenarios. Especialmente la modelación bidimensional ha emergido como una alternativa eficiente para representar de manera precisa los flujos de agua en superficies complejas, donde estos influyen diversos factores tales como la topografía, el uso de suelo y cambio en el clima.

El análisis de estas herramientas digitales es esencial, ya que existen métodos necesarios para predecir y evaluar situaciones como inundaciones, desbordamientos o escorrentías. Además, las herramientas de cálculo a medida que aumentan la población y el cambio climático representan un papel fundamental en la toma de decisiones basadas en datos reales. Este trabajo surge a través de la necesidad de conocer y comparar las diversas herramientas disponibles para llevar a cabo los distintos tipos de modelaciones, centrándose especialmente en aquellas que son gratuitas y accesibles tanto para estudiantes, instituciones y profesionales que cuentan con recursos limitados.

El objetivo primordial de esta monografía es examinar su funcionamiento, las ventajas y limitaciones de algunas herramientas computacionales más empleadas en la modelación hidráulica bidimensional, además es un intento de explicar las ecuaciones que controlan este tipo de análisis y hacer una comparación detallada entre ambos programas gratuitos de amplio uso los cuales son “HEC-RAS e IBER”. Para tal fin, se realizó un análisis detallado de artículos científicos y revisiones de fuentes que permiten respaldar el contenido de manera académica.

1. Modelación Hidráulica

La modelación hidráulica es un recurso fundamental para el estudio y el control de los sistemas hidráulicos, ya que nos permite la aproximación al comportamiento real de los cuerpos de agua, las redes de distribución, los conductos, los ríos, entre otros. La creación de modelos hidráulicos nos permite examinar el desempeño de los sistemas actuales, valorar diferentes contextos operativos y crear nuevas infraestructuras ajustadas a las circunstancias particulares. De igual manera, en determinadas situaciones, la modelación puede ayudar a mejorar la optimización de redes, incrementando su eficiencia y funcionalidad.

Es vital que se lleve a cabo correctamente la formulación, calibración y validación de los modelos hidráulicos para garantizar que los resultados proporcionados por estos, se representen con la mínima exactitud la realidad física del sistema objeto de estudio. Así pues, el modelado hidráulico no solo brinda soporte en la etapa de diseño, sino que también es un instrumento crucial en el proceso de elección. Las cuales están relacionadas con la organización, la reducción de riesgos y la administración de recursos hídricos. (Bonilla et al., 2024)

1.1. Historia de la Modelación Hidráulica y su Evolución Histórica

La modelación hidráulica ha sufrido una transformación considerable desde sus comienzos hasta convertirse en un instrumento imprescindible para la ingeniería moderna. En sus primeras etapas, los estudios hidráulicos se basaban en métodos empíricos y en modelos físicos de gran envergadura, que permitían la observación del comportamiento del agua bajo condiciones reguladas. Aunque estos procedimientos resultaban beneficiosos, tenían limitaciones para representar fenómenos complejos y de gran envergadura. (Álvarez Rengifo, 2022)

A partir de la década 1990, el uso de sistemas de información Geográfica (SIG) y teledetección ha cambiado la modelación hidráulica, dando paso a una nueva era. Esta evolución ha facilitado a creación de modelos distribuidos especialmente y ha mejorado notablemente la precisión de las simulaciones. En estos últimos años, el acceso a modelos de código abierto como “HEC-RAS e IBER”, ha democratizado la práctica de la modelación hidráulica, el cual esto ha permitido su aplicación en diversos ámbitos tales como estudio de riesgo de inundaciones, diseño de infraestructura hidráulicas, entre otros. La tendencia actual se orienta hacia la integración de modelos hidráulicos con modelos hidrológicos y sistemas de alertas tempranas como respuesta a los desafíos que impone el cambio climático

1.2. Fundamentos Teóricos y su Evolución

La modelación hidráulica se fundamenta en principios físicos y matemáticos, permitiendo describir el comportamiento del agua en diferentes entornos. Esta disciplina ha experimentado un notable desarrollo gracias a los avances en la computación, o que ha potenciado las capacidades de simulación en la ingeniería hidráulica. En su base teórica, la modelación hidráulica utiliza las ecuaciones de Saint- Venant que representan los principios de la conservación de masa y cantidad de movimiento, formuladas en 1871, estas ecuaciones, provenientes de una simplificación de la ecuaciones de Navier-Stokes, son fundamentales para la modelación el flujo unidimensional de canales abiertos, considerando factores como inercia, gravedad, fricción, la cual es clave para analizar fenómenos como crecidas y tránsito de ondas en cauces naturales y artificiales. (Edmundo Pedroza González, 2018).

Durante el siglo XX, la modelación hidráulica se realizaba principalmente mediante modelos físicos a escala, los cuales presentaban limitaciones por los altos costos de dificultad de réplica en ciertos fenómenos. Sin embargo, a partir de las décadas de 1970 y 1980, la mejora en

la capacidad de procesamiento de los computadores permitió el desarrollo de modelos numéricos, facilitando la resolución eficiente de las ecuaciones de Saint-Venant y dando lugar a modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales, que ofrecen mayor detalle espacial y temporal. (M^a Remedios Rebolledo & Juan Carlos Ortega Prieto, 2020).

El progreso teórico ha ido acompañado del desarrollo de herramientas computacionales especializadas, entre los programas más utilizados se encuentra HEC-RAS, software creado por el cuerpo de ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, que posibilita una simulación de flujos en canales mediante modelos 1D o 2D, siendo ampliamente empleados en la evaluación de riesgos de inundaciones y diseño de sistemas hidráulicos. Asimismo, el software libre IBER, desarrollado por el grupo de investigación en Ingeniería del Agua de la Universidad de A Coruña, permitiendo simular flujos superficiales bidimensionales utilizando las ecuaciones de Saint-Venant 2D, y son aplicadas en estudios de inundabilidad, hidráulica urbana y restauración fluvial.

Actualmente, la modelación hidráulica integra tecnologías como Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes satelitales y métodos de teledetección, lo cual facilita una mayor precisión en la representación de la topografía y las condiciones hidrológicas. Además, esta disciplina ha evolucionado hacia un enfoque interdisciplinario, vinculando la ingeniería civil, la hidrología, climatología y la planificación urbana, lo que facilita estudios integrales para la gestión de riesgos ante desastres, el cambio climático y la ordenación territorial. (M^a Remedios Rebolledo & Juan Carlos Ortega Prieto, 2020).

2. Ecuaciones de Gobierno que Rigen los Flujos Bidimensionales

Es esencial modelar flujos superficiales en dos dimensiones para entender y anticipar el comportamiento hidráulico en ríos, canales y áreas propensas a inundaciones. Este tipo de modelación se basa en un conjunto de ecuaciones de gobierno que especifican el mantenimiento de la masa y la cantidad de desplazamiento del agua. Estas ecuaciones permiten simular fenómenos complejos como las inundaciones, la movilización de sedimentos y la relación entre el flujo y las estructuras de agua (Paredes & Mejía 2024)

Las ecuaciones de Saint-Venant se utilizan frecuentemente en modelación bidimensional, también conocida como ecuaciones de aguas someras. Estas facilitan las ecuaciones de Navier Stokes y son empleadas cuando la longitud horizontal del flujo exceda considerablemente la profundidad vertical. Esta simplificación permite demostrar de manera efectiva el comportamiento del flujo en extensas áreas superficiales, manteniendo un equilibrio entre precisión y requerimientos computacionales. Son una de las más empleadas en la modelación bidimensional, también denominada como ecuaciones de aguas someras. Esta simplificación posibilita ilustrar eficazmente el comportamiento del flujo en grandes áreas superficiales, preservando un balance entre exactitud y necesidades de computación.

El uso de estas ecuaciones en modelos numéricos ha jugado un papel crucial en la elaboración de herramientas para la simulación hidráulica. Programas como HEC-RAS e IBER utilizan las ecuaciones de Saint Venant para simular flujos bidimensionales en diversas aplicaciones, desde el diseño de infraestructuras acuáticas hasta el manejo de riesgos por inundaciones. Es crucial indicar que, aunque las ecuaciones de Saint-Venant ofrecen una representación apropiada para diversos contextos, poseen limitaciones en situaciones donde no se cumplen las premisas de flujo poco profundo, como flujos extremadamente turbulentos o con

modificaciones significativas en la topografía. En estas circunstancias, podrían utilizar modelos más sofisticados en ecuaciones complejas de Navier-Stokes.

2.1. Ecuaciones de Gobierno

Las ecuaciones de gobierno representan el fundamento esencial destinado a la representación matemática del flujo hídrico en medios naturales como en infraestructuras artificiales. Estas ecuaciones, que se originan a partir de los principios físicos que regulan el comportamiento de los fluidos, posibilitan la modelación aproximada pero funcional del movimiento del agua considerando dos dimensiones espaciales. (Maldonado Villanueva, 2011)

En el ámbito de la modelación hidráulica bidimensional, es fundamental comprender tres conjuntos de ecuaciones que han permitido la evolución de las tecnologías computacionales actuales: las ecuaciones de Navier-Stokes, las ecuaciones de aguas someras y las ecuaciones de Saint-Venant. Cada una de estas formulaciones matemáticas aborda el problema del flujo bidimensional desde diferentes niveles de simplificación y bajo distintas consideraciones físicas

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen la base teórica más completa, describiendo el movimiento de los fluidos mediante principios fundamentales de conservación. Sin embargo, debido a su complejidad matemática, frecuentemente se recurre a simplificaciones como las ecuaciones de aguas someras, que resultan particularmente útiles cuando la dimensión horizontal del flujo supera significativamente su profundidad. Entre estas simplificaciones, las ecuaciones de Saint-Venant han ganado especial relevancia en la modelación hidráulica por su balance entre precisión física y viabilidad computacional (Chaudhry, 2024)

En la siguiente sección, cada uno de estos sistemas de ecuaciones se hablará con más detalle, donde se especificará sus conceptos básicos teóricos, los supuestos más importantes,

las formulaciones matemáticas. Este conocimiento es indispensable para comprender la función interna de los programas de simulación hidráulica e interpretar sus resultados correctamente

2.2.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen la base matemática para describir el movimiento en fluidos viscosos no newtonianos. Su formulación se debe a Claude-Louis Navier (1822), quien introdujo la viscosidad en las ecuaciones de movimiento de fluidos a partir de un modelo nuclear, y a George Gabriel Stokes (1845), quien generalizó esta formulación y estableció la relación lineal entre esfuerzos viscosos y gradientes de velocidad, conocidas como la ley de viscosidad de Newton. (Xavier Mora, 2017)

Estas ecuaciones adquieren su importancia porque integran en un solo cuerpo matemático los tres pilares de la física clásica, como lo son las leyes de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía. Los proyectan al dominio de los fluidos como medios continuos, estos constituyen una generalización de las leyes de Newton que incorpora simultáneamente las fuerzas inerciales y las asociadas a la viscosidad. Este marco amplió las ecuaciones de Euler (1757), describe fluidos ideales sin viscosidad, gracias a la incorporación de la viscosidad permitió modelar fenómenos reales como la resistencia interna y la disipación de energía en fluidos.

Las ecuaciones se deducen aplicando las bases fundamentales que rigen el comportamiento de los fluidos a un volumen diferencial de fluido, considerando:

2.1.1.1. Conservación de la Masa (continuidad).

La masa se conserva en el fluido, expresado por la siguiente ecuación:

La ley de conservación de la masa, también denominada ecuación de continuidad es uno de los principios fundamentales en la mecánica de fluidos, el cual establece que la masa de un

fluido se conserva en cualquier volumen de control a lo largo del tiempo. Esto implica que la variación temporal de la masa dentro de un volumen debe ser igual al fluido neto de masa que entra o sale del volumen.

Las ecuaciones de Navier Stokes, describen el movimiento de fluidos viscosos newtonianos, la conservación de la masa es un principio importante que se combina con la conservación del momento lineal para formar un conjunto de ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido. (Luisyep, 2023).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

Donde:

ρ =Densidad

u =Vector velocidad (Jhann Marco Quintanilla González, 2023)

Para fluidos incompresibles, la densidad es constante y la ecuación se simplifica a:

$$\nabla \cdot u = 0$$

2.1.1.2. Conservación del Momento (Segunda Ley de Newton).

La conservación del momento o segunda ley de Newton aplicada a fluido se refiere al principio según el cual la tasa de cambio del momento lineal de un fluido es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre él. Cuando esta ley se aplica a un fluido en movimiento, se traduce en un principio fundamental que describe como las fuerzas internas y externas afectan el movimiento del fluido.

Esta conservación se expresa mediante las ecuaciones de Navier Stokes, que son un conjunto de ecuaciones parciales que describen el comportamiento dinámico de un fluido viscoso newtonianos. (Luisyep, 2023). y esta se deduce de la siguiente manera:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla * u)u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g$$

Donde:

p =Presion

μ =Viscocidad dinámica

g =Aceleracion gravitacional.

u =Vector velocidad

ρ =Densidad

En termino de $\mu \nabla^2 u$ representa la difusión viscosa, derivada de la ley de viscosidad de newton.

2.1.1.3. Formulación Vectorial y Tensorial.

La formulación tensorial es una extensión de la vectorial que permite describiré con mayor precisión las tenciones internas y deformaciones en el fluido. En esta formulación, las cantidades físicas se presentan mediante tensores, que son objetos matemáticos que generalizan los vectores y escalares a múltiples dimensiones y componentes. (Brav, s. f.)

En notación tensorial, para un fluido newtoniano, las ecuaciones se expresan como:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right)$$

Donde:

i, j = Representan las componentes espaciales

p = Presión

μ = Viscosidad dinámica

∂ = Derivada parcial

u_i = Componente i -ésima del vector velocidad

ρ = Densidad

2.1.1.4. Ecuaciones Derivadas y Simplificaciones.

De las ecuaciones de Navier-Stokes se obtienen otras formulaciones bajo condiciones particulares:

- Ecuaciones de Euler: Si la viscosidad es nula ($\mu = 0$), las ecuaciones se reducen

a:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla * u)u \right) = -\nabla p + \rho g$$

Donde:

ρ = Densidad

g = Aceleración gravitacional.

u = Vector velocidad

p = Presión

Su formulación surge al aplicar la segunda ley de Newton en un sistema de coordenadas cartesianas, estableciendo una relación entre la aceleración del elemento fluido y las fuerzas que actúan sobre él. Aunque inicialmente no incorporaron la velocidad, las ecuaciones de Euler

continúan siendo fundamental para analizar numerosos flujos prácticos donde la influencia viscosa es mínima. Así mismo Euler investigo como la convección natural, el equilibrio atmosférico y el comportamiento de los fluidos bajo diversas condiciones, con el objetivo de desarrollar una representación matemática que permitirá anticipar el movimiento de fluidos ideales en múltiples contextos de ingeniería. (Juan Luis Vázquez, 2004).

2.1.1.5. Ecuación de Stokes.

Para flujos laminares con velocidades bajas, se desprecia el termino conectivo, quedando de la siguiente manera:

$$0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g$$

Donde:

ρ =Densidad

g =Aceleración gravitacional.

u =Vector velocidad

p =Presion

Cuando el número de Reynolds es muy bajo, indicando que la viscosidad domina sobre la inercia, las ecuaciones de Navier-Stokes se reduce a las ecuaciones de Stokes. Esto ocurre en el proceso de sedimentación de partículas pequeñas en fluidos viscosos, el flujo en medios porosos o micro canales. En estas condiciones, el termino no lineal que representa la aceleración conectiva desaparece, lo que convierte el sistema en un conjunto lineal de ecuaciones mucho más fácil de implementar desde el punto de vista computacional. (G. K. Batchelor, 2000).

Ecuaciones de Reynolds: Para flujos turbulentos, se promedian las ecuaciones de Navier-Stokes y se introducen términos adicionales para modelar las fluctuaciones turbulentas. (Adrián Pedrozo-Acuña & Alec Torres-Freyermuth, 2011)

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} \bar{u}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \langle \bar{u}_i \bar{u}_j \rangle \right) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{p} + \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} \bar{u}_i - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \langle \delta u_i \delta u_j \rangle$$

Donde:

ρ =Densidad

$\bar{u}_i$ =Componente i-ésima de la velocidad

p =Presion

t =Tiempo

x, y =Componentes espaciales

2.2. Ecuaciones de Aguas Someras

Las ecuaciones de aguas someras, frecuentemente conocidas como ecuaciones de Saint Venant, son un grupo de ecuaciones diferenciales parciales que emulan el comportamiento de las corrientes hídricas en canales abiertos y ríos, especialmente cuando la extensión horizontal del flujo excede significativamente su profundidad. Adhémar Jean Claude Barré de Saint Venant surgió las ecuaciones en 1871 como una simplificación de las ecuaciones de Navier Stokes, considerando que la presión ejercida regulada, por un perfil de aceleración hidrostática y que las aceleraciones verticales son notables en comparación con las horizontales son significativas.

Principalmente, el sistema de Saint-Venant se compone de dos ecuaciones las cuales son:

- Ecuación de la continuidad: Simboliza la prevención de la masa

- Ecuación de cantidad de movimiento: Indica la preservación del momento lineal

Estas ecuaciones posibilitan la descripción de flujos subcríticos y supercríticos en una o dos dimensiones, simplificando su uso en programas informáticos y su uso práctico en diferentes contextos, como simulaciones de crecidas, estudio de corrientes y diseño de estructuras hidráulicas

En el campo académico, se han llevado a cabo varias investigaciones con el objetivo de incrementar la exactitud y utilidad de estas ecuaciones. Por ejemplo, (Gloria Estefany Amarís Castro et al., 2015) se analizó el comportamiento de las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión 1D bajo distintas configuraciones de pendiente y régimen de flujo, utilizando simulaciones numéricas para estudiar situaciones de flujo subcrítico, supercrítico y horizontal.

Los descubrimientos demostraron la eficacia de estas ecuaciones en diversas situaciones hidráulicas, destacando la importancia de seleccionar el modelo (dinámico, difuso o cinemático) conforme a las condiciones hidráulicas.

Asimismo, (Luis Cea et al., 2009) presento un método semi-analítico para solucionar las ecuaciones de Saint Venant, lo cual permite lograr soluciones más precisas y eficientes en lugar de métodos puramente numéricos. Este procedimiento es particularmente ventajoso en uso de ingeniería donde se requiere un balance entre precisión y efectividad computacional.

Las ecuaciones de aguas someras se generan integrando verticalmente las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible, bajo las siguientes hipótesis (Espen Knudsen Eidsvag, 2016):

2.2.1.1. Hipótesis de la Presión Hidrostática.

La presión vertical sigue una distribución hidrostática.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\rho g$$

$$p(x, y, z, t) = \rho g(h(x, y, t) - z) + p_{atm}$$

Donde:

$p(x, y, z, t)$: Presión absoluta en el punto de coordenadas

ρ = Densidad

g =Aceleración gravitacional.

$h(x, y, t)$ = Cota libre del agua

z =Coordenada vertical

p_{atm} =Presion atmosférica

2.2.1.2. Velocidad Vertical Despreciable.

Las aceleraciones verticales son insignificantes $g(w \ll u, v)$, permitiendo desacoplar las componentes horizontales y verticales al integrar las ecuaciones de Navier-Stokes en la dirección vertical (z), se elimina la dependencia de z , obteniendo Ecuación de continuidad (Conservación de la masa): Integrando en la ecuación de continuidad de Navier-Stokes en la vertical ($z = -H$ a $z = H$)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (hu) = 0$$

Donde:

$u = (u, v)$ Velocidad horizontal promediada en profundidad

t = Tiempo

∂ = Derivada parcial

hu = Flujo volumétrico superficial por unidad del ancho

2.2.1.3. Ecuación de Momento Horizontal.

Integrando las ecuaciones de momento de Navier-Stokes y aplicando la presión hidrostática, se tiene lo siguiente:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \nabla * (hu \otimes u) + \frac{1}{2}g\nabla h^2 = -gh\nabla b + \nabla * (h\tau) + \text{terminos de fricción}$$

Donde:

$b(x, y)$ = Cota de fondo respecto al plano de referencia

τ = Esfuerzos viscosos.

g = Aceleración gravitacional

$h(x, y, z)$ = Profundidad de la lámina de agua (Luc M.A. Burgerjon, 2021)

Las ecuaciones de aguas someras (SWEs), tiene representaciones en dos dimensiones, integrados extensamente en programas informáticos actuales para el estudio del comportamiento hidráulico, incluyendo HEC-RAS 2D, IBER, entre otros. En la actualidad, estas ecuaciones constituyen el fundamento de numerosas herramientas de modelado numérico que emplean ingenieros civiles e hidráulicos a nivel global. Su aplicación abarca desde el análisis de la amenaza de inundaciones hasta el diseño de infraestructuras de drenaje, la evaluación de obras hidráulicas y la planificación del territorio.

2.2.2. *Ecuaciones de Saint-Venant*

Las ecuaciones de Saint-Venant tienen su origen en el siglo XIX y representan un hito fundamental en la modelación hidráulica. Estas ecuaciones describen el flujo superficial en canales abierto y provienen de una simplificación de las ecuaciones fundamentales de Navier-Stokes. Su formulación fue propuesta por el matemático e ingeniero francés Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant, a quien deben su nombre. (VEN TE CHOW, 1957)

A lo largo del siglo XIX, la hidráulica era una ciencia aún en desarrollo. Los estudios se centraban mayormente en flujos permanentes, pero los fenómenos no permanentes, como crecidas o fluctuaciones en ríos, eran difíciles de representar matemáticamente. Fue en este contexto que Saint-Venant, en 1871, presentó su artículo “Teoría del movimiento no permanente de las aguas, con aplicación a las crecidas de los ríos y a la introducción de las mareas en su cauce.”

En dicho trabajo, Saint-Venant propuso un grupo de ecuaciones diferenciales parciales que representan la conservación de la masa y del momento lineal para flujos en canales abiertos. Estas ecuaciones consideran las variaciones temporales y espaciales del flujo, representando así un avance significativo respecto a los modelos puramente empíricos utilizados hasta entonces.

Aunque su formulación inicial fue unidimensional (1D), el desarrollo posterior de la hidráulica computacional permitió extender las ecuaciones a dos dimensiones (2D), considerando también las variaciones del flujo en el plano horizontal. Este avance ha sido crucial para aplicaciones como la modelación de inundaciones, avenidas urbanas, estuarios y áreas costeras.

Las ecuaciones originales de Saint-Venant se derivan de una integración en la dirección vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes, bajo supuestos como flujo incompresible y de

densidad constante, pequeñas pendientes del canal, ausencia de aceleraciones verticales significativas, entre otros. Con los supuestos, Saint-Venant logro formular un modelo físico-matemático adecuado para el flujo inconstante en canales abiertos. Las ecuaciones en 1D de Saint Venant se presenta como la ecuación de continuidad y de momento.

En la formulación unidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant Para flujos en canales rectos, el sistema bidimensional se reduce a

2.2.2.1. Ecuación de Continuidad.

Considerando un tramo diferencial de canal de longitud δx , el cambio de volumen de agua dentro de este tramo se relaciona con la variación del flujo entre entrada y salida. Matemáticamente esto se expresa de la siguiente manera

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Donde:

$A(x, t)$ =Area de la sección transversal

Q =Caudal

∂ = Derivada parcial

- Ecuación de momento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_o) = 0$$

Donde:

S_f =Pendiente por fricción, que puede modelarse mediante la ecuación de Manning

S_o =Pendiente del fondo del canal

Q =Caudal

∂ = Derivada parcial

g = Aceleración gravitacional

$A(x, t)$ = Area de la sección transversal

Esta ecuación representa la conservación del momento lineal, considerando la aceleración del flujo, la presión hidrostática y las fuerzas de resistencia. (Hugo Alfredo Carrillo Serrano, 2015)

Con el crecimiento del poder computacional a partir de mediados del siglo XX, se comenzaron a desarrollar versiones numéricas más complejas de las ecuaciones de Saint-Venant. Así surgieron las ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations), también conocidas como ecuaciones de Saint-Venant 2D. (Gloria Estefany Amarís Castro et al., 2015)

Estas versiones 2D permiten simular el flujo de agua en superficies planas, considerando variaciones en las direcciones “x” y “y”. Son especialmente útiles para modelar fenómenos como inundaciones, flujos en planicies aluviales y zonas urbanas. La versión 2D de estas ecuaciones también parte de la simplificación de Navier-Stokes bajo el mismo principio de presión hidrostática

2.3. Limitación de las Ecuaciones de Gobierno

Las ecuaciones de gobierno son la base matemática para describir el movimiento de los fluidos, mas, sin embargo, su aplicación implica aceptar una serie de hipótesis que restringen su rango de validez y generar incertidumbres en la modelación.

2.3.1. Limitaciones de las Ecuaciones de Navier-Stokes

Estas ecuaciones constituyen la base de la mecánica de fluidos, ya que expresan los principios de la conservación de masa y cantidad de movimiento en fluidos viscosos

newtonianos. Sin embargo, si aplicación práctica está limitada por varios factores que deben considerarse antes de utilizarlas en la modelación hidráulica.

En primer lugar, su formulación se basa en la hipótesis del continuo, lo que implica que las variables como densidad, velocidad y presión varían de manera suave y continua en el espacio, ya que la dimensión característica del problema se aproxima a la longitud libre media, esta hipótesis pierde validez y es necesario recurrir a los modelos cinéticos, como la ecuación de Boltzmann (Madroñal, 2019)

Desde una perspectiva matemática, las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones son no lineales y acopladas, lo que impide obtener soluciones analíticas generales. Aún se desconoce si, para datos iniciales suaves, las soluciones permanecen regulares en el tiempo o pueden desarrollar singularidades. Este problema sigue siendo uno de los grandes desafíos matemáticos, reconocido dentro de los Problemas del Milenio por el Clay Mathematics Institute (Madroñal P. , 1989). Además, su naturaleza no lineal da origen a la turbulencia, un fenómeno multiescala cuyo tratamiento directo mediante Simulación Numérica Directa (DNS) requiere discretizar todas las escalas espaciales y temporales. Esto implica una demanda computacional proporcional a $Re^{9/4}$, lo que hace inviable su aplicación en la mayoría de los flujos de ingeniería. En su lugar, se utilizan modelos de cierre como RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) LES (Large Eddy Simulation), que incorporan hipótesis adicionales y parámetros calibrados, reduciendo la universalidad del modelo.

Otro aspecto fundamental es la imposición de las condiciones de frontera, especialmente en geometrías complejas como superficies libres, interfases multifásicas y medios porosos. La formulación numérica de contornos puede generar errores sistemáticos o desestabilizar el cálculo. Asimismo, para capturar gradientes pronunciados es necesario usar mallas

suficientemente finas, lo que incrementa el costo computacional y la severidad de la restricción de estabilidad de Courant

Por último, en flujos compresibles de alta velocidad, los términos adicionales relacionados con la energía interna y las variaciones de densidad deben incluirse. La versión incomprensible de Navier-Stokes, común en hidráulica, pierde validez cuando el número de Mach supera 0.3 o en presencia de ondas de choque.

2.3.2. Limitaciones de las Ecuaciones de las Aguas Someras y Saint-Venant

La ecuación de aguas someras se ha empleado extensamente en la modelación de flujos, canales abiertos y otras infraestructuras de agua, gracias a su balance entre exactitud y eficacia computacional. Sin embargo, estas ecuaciones tienen restricciones inherentes a las premisas establecidas en su formulación, que deben ser comprendidas al momento de aplicarlas a casos reales. Uno de los obstáculos más significativos está vinculado a la hipótesis que facilitan la simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener las de Saint-Venant. Entre estas, se encuentra la suposición de que el flujo es predominante horizontal y que el elemento vertical de la velocidad es despreciable. Esto significa que se omite las aceleraciones verticales, lo cual es lógico en flujos lentos y con poca inclinación, pero puede ser insuficiente en áreas donde el gradiente del suelo es marcado o donde el flujo muestra transiciones rápidas y bruscas (Castro et al., 2015c). En estas situaciones, el modelo puede subestimar fenómenos como la formación de ondas estacionarias, cambios de régimen o interacciones complejas con obstáculos y estructuras.

Además, las ecuaciones de Saint-Venant poseen una capacidad restringida para ilustrar fenómenos transitorios extremadamente dinámicos, como los provocados por fuertes lluvias o

roturas de presas. En estos sucesos generalmente implican altas velocidades y cambios drásticos en el nivel de agua, lo cual puede comprometer la estabilidad numérica y la precisión del modelo. Adicionalmente estas ecuaciones se han establecido para sistemas de flujos subcríticos o gradualmente variado, por lo que su uso en estas situaciones supercríticas o extremadamente turbulentas demanda modificaciones o complementos que incrementan la complejidad del modelo (*Iber: Herramienta de Simulación Numérica del Flujo En Ríos*, s. f.)

Otro factor a tener en cuenta es la reacción de los resultados a las condiciones de frontera y a los parámetros físicos empleados en la simulación, como la rugosidad del lecho, la inclinación longitudinal y la geometría del canal. Un error mínimo en la estimación de algunos de estos valores puede provocar variaciones importantes en los resultados, particularmente en, modelos de gran tamaño o con topografías complicadas. La calidad del modelo digital del terreno (MDT) es fundamental, dado que en una resolución deficiente puede impedir la captura de detalles relevantes de la morfología que influye directamente la conducta o comportamiento del flujo,

Además, estas ecuaciones nos permiten una representación detallada en los aspectos tridimensionales del flujo. Aspectos como la estratificación vertical, la existencia de vórtices o la interacción entre capa a diferentes velocidades quedan fuera de la capacidad de este método dimensional, en sistemas de ríos naturales o urbanos donde estas particularidades son significativas, como en confluencias o áreas de vegetación abundante, es necesario complementar estas ecuaciones con otros modelos o emplear técnicas tridimensionales más sofisticadas. Pese a estas restricciones, las ecuaciones de aguas someras continúan siendo un instrumento eficaz y fiable para un rango de aplicaciones hidráulicas. No obstante, su uso adecuado requiere de una valoración crítica del entorno físico, así como de los objetivos del

estudio y de los datos disponibles para garantizar que las suposiciones asumidas no pongan en riesgo la validez de los resultados logrados.

2.4. Modelos de Propagación de Ondas

Los modelos de propagación de ondas representan aproximaciones matemáticas fundamentales para describir el comportamiento del flujo en sistemas hidráulicos, particularmente en canales abiertos y cuencas de flujo. Estos modelos se derivan de las ecuaciones de Saint-Venant, que forman la base matemática para el modelo hidrodinámico bidimensional (Arrieta Benavides, 2019). Dependiendo del grado de simplificación adoptado y los términos considerados de estas ecuaciones, surgen tres modelos principales: ondas cinemáticas, ondas difusas y ondas dinámicas, cada uno con niveles variados de complejidad y aplicabilidad.

El origen de estos modelos se basa a través de las ecuaciones de Saint-Venant, ya que son un sistema de ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo unidimensional no permanente en canales abiertos. Estas ecuaciones se derivan de los principios fundamentales de conservación de la masa y momento, lo cual constituyen a la base para el desarrollo de los modelos de propagación de ondas. La necesidad de simplificar estas ecuaciones para facilitar su aplicación en problemas de ingeniería hidráulica llevó al desarrollo progresivo de los modelos de ondas cinemáticas, difusas y dinámicas, cada uno representando un nivel diferente de aproximación a las ecuaciones (Cristiana Di Cristo a, 2018).

2.4.1. *Modelo de Onda Cinemática*

El modelo de onda cinemática representa la simplificación más básica de las ecuaciones de Saint-Venant. Se basa en la suposición de que las fuerzas y presión son despreciables o irrelevantes en comparación con las fuerzas de fricción y gravitacionales (M. J. Lighthill, M. J. Lighthill, F.R.S. and G. B. Whitham). En este modelo, la ecuación de momento se simplifica a:

$$S_f = S_o$$

Donde:

S_f = Pendiente de energía o fricción

S_o = Pendiente del fondo del canal

Esto conlleva a un balance entre las fuerzas de gravedad y las fuerzas de fricción.

Mediante la combinación de esta simplificación con una ecuación de resistencia al flujo como la de Manning, se logra una relación única entre el caudal y la profundidad de agua:

$$Q = \alpha A^\beta$$

Donde:

Q = Caudal

A = Área hidráulica mojada

α, β = Parámetro que depende de la geometría del canal

Este modelo se usa extensamente para la modelación de escorrentías superficiales en cuencas hidrográficas y para resolver problemas de eventos de crecida en ríos con inclinaciones

que van de moderadas a fuertes ((Sinighh, 2019)). Sus mayores beneficios comprenden su sencillez computacional y a habilidad para capturar correctamente la reducción del hidrograma de crecimiento gracias a la resistencia al flujo, sin embargo, este modelo tiene restricciones importantes, una de ellas es que no puede representar efectos de remanso, no considera la aceleración local y conectiva del flujo y por ultimo no es apropiado para canales con inclinaciones bajas o para situaciones donde las fuerzas inerciales son relevantes (Zimmermann, 2000).

2.4.2. Modelo de Ondas Difusas

El modelo de onda difusa representa un nivel de aproximación intermedio entre los modelos de onda cinemática y dinámica, este modelo conserva variables de presión en la en la ecuación de momentum, pero ignora las variables de aceleración y conectiva (Zhan, 2025). la ecuación de momentum simplificada queda de la siguiente manera

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f - gAS_o = 0$$

Donde:

g = Aceleración gravitacional

A = Área hidráulica mojada

h = Altura de flujo

S_f = Pendiente de energía o fricción

S_o = Pendiente del fondo del canal

Esta ecuación indica que la pendiente de fricción es igual a la pendiente del fondo menos el gradiente de profundidad.

Este modelo de onda difusa resulta especialmente beneficioso para simular flujos en canales con inclinaciones suaves y cuando los efectos de remanso son significativos pero las aceleraciones conexas continuas siendo mínimas. Este modelo tiene capacidad de ilustrar la atenuación y propagación de la onda de crecimiento, además de los resultados de remanso provocados por estructuras hidráulicas o confluencias. Sus principales restricciones comprenden la incapacidad de representar flujos supercríticos (número de Froude mayor a 1) y situaciones donde las fuerzas inerciales son significativas, como flujos rápidamente variados (Castro, 2015)

2.4.3. *Modelo de Onda Dinámica*

El modelo de onda dinámica representa la solución completa de las ecuaciones de Saint-Venant sin simplificaciones significativas. Este modelo considera todos los términos de las ecuaciones de continuidad y de momento. (Ecuación de momento y continuidad), por lo cual este modelo es el más completo y preciso para representar flujos no permanentes en canales abiertos y ríos. Es particularmente apropiado para simular circunstancias con flujos rápidamente fluctuantes, intensos efectos de remanso, inversiones de flujo y la propagación de onda de crecimiento en ríos con inclinaciones suaves (Auersch, 2014)

El modelo permite representar correctamente regímenes de flujo subcrítico. Supercrítico y mixtos, así como transiciones entre estos regímenes, no obstante, su aplicación informática es más complicada y demanda más recursos de computación en comparación con los modelos más simplificados.

2.5. Métodos Numéricos

Los métodos numéricos constituyen herramientas fundamentales para resolver ecuaciones diferenciales parciales las cuales explican el flujo en canales abiertos, entre las que se encuentran las ecuaciones Saint-Venant, entendiendo que estas ecuaciones se caracterizan por ser no lineales y complejas, no es posible resolverse de una forma analítica mayormente en casos aplicables reales. Es por esto, que se adoptan técnicas numéricas como lo es método de diferencias finitas, volúmenes finitos o incluso elementos finitos, los cuales facilitan lograr una aproximación a las soluciones mediante el uso de computadoras. Estas metodologías transforman las derivadas espaciales y temporales en expresiones algebraicas, y de esta forma facilitan la simulación de fenómenos hidráulicos complejos como lo es la proliferación de crecidas, interacción con estructuras hidráulicas, o la escorrentía en cuencas de carácter urbano o rural (Mathews, 2000).

Esta selección del método numérico apropiado es dependiente del tipo de modelo de onda a utilizar (cinemática, difusa o dinámica), del régimen de flujo (subcrítico, supercrítico o mixto), junto con los factores particulares de los canales o ríos. Estos esquemas explícitos, como Lax y Lax-Wendroff, se caracterizan por su simplicidad y rápidos, sin embargo, necesitan pasos de tiempo pequeños para lograr su estabilidad numérica. Caso contrario, aquellos esquemas implícitos, como lo es el de Preissmann, permiten una gran estabilidad y por ende facilitan trabajar con pasos de tiempo más largos, no obstante, requieren con una mayor capacidad computacional. Por medio de la mejora en tecnologías y desarrollo de software especializado, los métodos numéricos han logrado transformarse en una herramienta importante para realizar una adecuada planificación, diseño y gestión eficaz de obras hidráulicas, que son clave en la evaluación del riesgo por inundaciones en territorios vulnerables (Métodos numéricos para ingenieros (Vol. 5, 2011).

2.5.1. *Volúmenes Finitos*

El método de volúmenes finitos se considera una técnica numérica la cual es usada en gran medida para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, particularmente en problemáticas de dinámica de fluidos entre los que describen el flujo en canales abiertos. Basándose este método en la conservación de cantidades físicas (masa y momento) en los que se encuentra dentro de volúmenes de control previamente establecidos a lo largo del dominio del problema. Una de sus principales ventajas surge en su garantía de conservación global de las propiedades físicas, siendo esto esencial para lograr soluciones más estables y físicamente lógicas en simulaciones hidráulicas (Cea, 2019).

Referente al escenario de las ecuaciones de Saint-Venant, el método de volúmenes finitos funciona con el principio de conservación integral en al que se encuentra sobre cada celda o volumen de control (Castellet, 2006). Las ecuaciones se formulan de forma general desde una perspectiva conservativa:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U)$$

Donde:

- U se considera el vector de variables conservadas, donde contiene el área hidráulica A y el momento Q,
- F(U) es el flujo convectivo,
- S(U) es el vector de fuentes que incluye efectos como fricción, pendiente del canal y presión.

Este método permite dividir el dominio en celdas discretas, y por esto el flujo entre estas celdas es calculado por medio de interfaces, permitiendo de esta forma resolver problemas con geometrías irregulares, discontinuidades y condiciones de contorno complejas. Por medio de su robustez y precisión que lo caracteriza, este método de volúmenes finitos es habitualmente aplicado en modelos hidráulicos avanzados permitiendo simular fenómenos como lo son crecidas rápidas de los caudales, flujos mixtos y efectos de estructuras hidráulicas.

2.5.2. *Diferencias finitas*

El método de diferencias finitas es una técnica numérica que se utiliza en gran medida para promediar soluciones de ecuaciones diferenciales de carácter ordinario como parciales. Su principio base trata acerca de reemplazar las derivadas continuas por diferencias finitas en una malla discreta del dominio del problema, convirtiéndola así, en una ecuación diferencial en un sistema de ecuaciones algebraicas cuya solución puede obtenerse a través de procedimientos . Uno de sus principales usos es aquel en el que simula de fenómenos físicos como lo es el flujo de agua en canales abiertos, permitiendo modelar la evolución del sistema respecto al tiempo y el espacio a través de la discretización de las diferentes variables que se encuentran involucradas (Ledesma, 2015).

Referente al caso de las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales permiten modelar el flujo no permanente en canales abiertos, este método al ser usado en diferencias finitas facilita la aproximación de sus derivadas espaciales y temporales por medio de fórmulas como la siguiente:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U)$$

Donde:

- U es el vector de variables conservadas, que incluye el área hidráulica A y el momento Q,
- F(U) es el flujo convectivo,
- S(U) es el vector de fuentes que incluye efectos como la fricción, la pendiente del canal y la presión.

La discretización convierte las derivadas en expresiones finitas como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} \approx \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t}, \quad \frac{\partial F(U)}{\partial x} \approx \frac{F(U_{i+1}^n) - F(U_i^n)}{\Delta x}$$

Estas características facilitan el cálculo del estado del flujo en cada punto de la malla a lo largo del tiempo. Es importante mencionar que este método no es tan conservativo respecto al de volúmenes finitos, sin embargo, sigue siendo utilizado en gran medida, todo esto por su eficiencia computacional, particularmente en escenarios en los cuales las variaciones del flujo no se encuentran tan abruptas y por tanto se requiere un rápido análisis del comportamiento hidráulico del sistema (Saucedo, 2005).

3. Herramientas Computacionales para la Modelación Hidráulica

La modelación hidráulica se ha transformado con el tiempo en una herramienta trascendental para la ingeniería moderna en donde se utiliza para el análisis, diseño y gestión de sistemas hídricos. Por medio de estos avances de la tecnología y de los métodos numéricos, actualmente es posible simular comportamiento del agua en diferentes condiciones e incluso escenarios por medio del uso de herramientas especializadas de computación. Estas herramientas logran resolver ecuaciones diferenciales de carácter complejo describiendo el flujo de agua en canales, ríos, redes de drenaje y estructuras hidráulicas, de esta forma permite una toma de decisiones técnicas y acciones que se basan en resultados precisos y confiables (Mora, 2018).

3.1. Clasificación de los Modelos Hidráulicos

La modelación hidráulica se caracteriza por ser una herramienta importante para lograr una comprensión, simulación e incluso predicción del comportamiento del agua tanto en sistemas naturales y artificiales. De acuerdo a esto, estos modelos hidráulicos se dividen respecto a su función de la forma en la cual se representan aquellos procesos físicos y matemáticos que están asociados al flujo de agua. De forma general estos se agrupan dentro de tres categorías principales: modelos empíricos, conceptuales y deterministas o físicos (Rodríguez, 2007).

Los modelos empíricos se distinguen por sus relaciones estadísticas y correlaciones que se observan entre variables hidráulicas junto con aquellas derivadas directamente de datos experimentales. Siendo más útiles en casos en los que se disponga de registros históricos que sean confiables y donde se necesiten estimaciones rápidas, A pesar de su capacidad para la predicción se encuentra limitada en condiciones similares a las observadas. Contrario a esto, los modelos conceptuales expresan el sistema por el cual componentes idealizados, como lo son

reservorios, canales y unidades de escorrentía se logran incorporar a procesos simplificados permitiendo simular la transformación de la precipitación en escorrentía, almacenamiento y flujo. Es por esto que estos modelos son utilizados en gran medida en proyectos de hidrología aplicada junto con estudios de cuencas hidrográficas (Cuervo Muñoz, 2012).

Adicional a estos, los modelos deterministas o físicos logran resolver de forma directa las ecuaciones que se rigen a través del movimiento del agua, en las que se encuentran ecuaciones de Navier-Stokes, las ecuaciones de Saint-Venant (en 1D o 2D) y demás formulaciones referentes a la conservación de masa y su cantidad de movimiento. Siendo así, estos modelos permiten lograr resultados mucho más detallados y precisos, entendiendo que consideran la geometría real del terreno, aspectos de borde variables junto con fuerzas físicas como la gravedad, fricción y la presión. Al mismo tiempo, se pueden clasificar de acuerdo a la dimensión espacial: entre los que se encuentran modelos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D), los cuales son seleccionados por medio de la complejidad del problema y los recursos computacionales disponibles.

3.2. Principales Características de las Herramientas Computacionales

Las herramientas computacionales las cuales son utilizadas en la modelación hidráulica han pasado por importantes mejoras significativas en las últimas décadas, en la cual pueden integrar enfoques avanzados numéricos, interfaces gráficas de fácil intuición junto a capacidades para generar visualización geoespacial. Es por esto que estas herramientas facilitan a los ingenieros y grupos de investigación poder simular y analizar múltiples fenómenos hidráulicos los cuales son considerados complejos, entre los que se encuentran flujos en canales abiertos,

tránsito de avenidas, interacción con estructuras hidráulicas, inundaciones, transporte de sedimentos e incluso de contaminantes (Foronda-Gutiérrez, 2022).

Dentro de las principales características que ofrecen estas herramientas se encuentran:

- Capacidad para representar diferentes regímenes de flujo, como flujos subcríticos, supercríticos y transitorios.
- Soporte para geometrías complejas y mallas irregulares, siendo crucial para lograr simular zonas urbanas o naturales con topografía accidentada.
- Incorporación de condiciones de frontera flexibles, entre los que se encuentran caudales variables, niveles de agua controlados, vertederos o compuertas.
- La viabilidad de poder realizar análisis de sensibilidad, calibración y validación con datos reales de campo.
- Interoperabilidad con Sistemas de Información Geográfica (SIG), de esta forma permitiendo integrar datos espaciales y temporales para así mejorar la confiabilidad y muestra de los resultados.
- Adicional a esto, algunas herramientas logran acoplar modelos hidrológicos, análisis de estructuras junto con modelación de calidad del agua y posibles variaciones climáticas futuras.

Dentro del campo profesional existen múltiples herramientas las cuales son reconocidas a nivel internacional, el uso de HEC-RAS, un software frecuentemente empleado para la modelación hidráulica de ríos y canales, el contenido está orientado a usuarios que deseen aprender a crear, configurar y ejecutar un proyecto en HEC-RAS, (Utexas.edu) es una página web. El cual fue desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos IBER (Usace, 2021). Esta es una herramienta de modelación 2D desarrollada en España, MIKE

11 y MIKE 21, del Instituto Danés DHI, y SWMM, del Environmental Protection Agency (EPA). y demás herramientas, las cuales ofrecen motores de cálculo robustos que son desarrollados bajo métodos numéricos así volúmenes finitos o diferencias finitas, y por diferentes aplicaciones de diseño han sido validadas, por medio de operación y evaluación de sistemas hidráulicos ámbitos reales (Palacio, 2018).

3.3. Tendencias y Avances en la Tectología de la Modelación

Es por esto por lo que el mejoramiento de estas tecnologías digitales ha provocado un impacto importante y por consiguiente un cambio en el campo de la modelación hidráulica, por el cual se promueve el desarrollo de herramientas continuamente más precisas, robustas y accesibles. Actualmente, una de las tendencias principales se enfoca en la transición de modelos unidimensionales a simulaciones bidimensionales (2D) e incluso tridimensionales (3D), los cuales facilitan la representación de mayor fidelidad respecto a la complejidad espacial de los flujos en cauces naturales, estructuras hidráulicas e incluso en diferentes zonas inundables. El crecimiento en la capacidad de las computadoras ha sido una de las causas de estas mejoras, así como la utilización de técnicas de paralelización y programación optimizada, los cuales reducen de una forma significativa los tiempos de simulación sin reducir su precisión (Franco Díaz, 2020).

Otro punto a destacar se encuentra en la integración de modelación hidráulica con mecanismos geoespaciales, entre los que se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales facilitan la integración de forma directa con la información topográfica, batimétrica y de uso del suelo, de esta forma mejora la calidad y realismo de las simulaciones. También, se ha logrado mejorar el uso de interfaces gráficas de fácil intuición en entornos

visuales de post-procesamiento donde permite facilitar el análisis de los datos por parte de los profesionales. Adicional se logra evidenciar un aumento en las iniciativas por soluciones de código abierto, permitiendo que las comunidades científicas y profesionales puedan mejorar y adaptar los modelos de acuerdo a sus necesidades. Finalmente, el uso de tecnologías en la nube ha permitido ampliar el alcance de los proyectos de modelación, facilitando un trabajo integrado y versátil entre diferentes integrantes del sector hídrico en tiempo real y desde cualquier ubicación geográfica (Hitt, 2017).

3.4. Herramientas HEC-RAS e IBER para la Modelación Hidráulica

Como parte del grupo de herramientas computacionales que se encuentran disponibles para simulación de fenómenos hidráulicos, las herramientas HEC-RAS e IBER resaltan como principales referentes en el ámbito académico, institucional y profesional, entendiendo su confiabilidad, capacidad de modelación junto con su grande documentación técnica. HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) es un software el cual fue creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, desarrollado de forma inicial para modelaciones unidimensionales en ríos y canales, aunque fue ampliada su capacidad para abordar capacidades bidimensionales (2D) en flujos no permanentes. Permitiendo resolver por medio de este programa ecuaciones de energía y de Saint-Venant por medio de métodos numéricos estructurados, incluyendo además componentes para realizar estudio de estructuras hidráulicas, transporte de sedimentos, calidad del agua, y comportamiento de presas y embalses. Cuenta con una interfaz gráfica amigable, junto con su interoperabilidad con HEC-HMS, ArcGIS y archivos LIDAR, lo transforman en una versátil herramienta que trae alto valor de ingeniería (Rincón, 2017).

Por otra parte, IBER es considerado un software de código abierto creado por las academias de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de las universidades de A Coruña y Zaragoza (España), desarrollado de forma específica para modelar el flujo superficial en dos dimensiones a través del uso de ecuaciones de Saint-Venant 2D. Su formulación de carácter numérico sigue el método de volúmenes finitos sobre mallas no estructuradas, logrando representar de forma precisa geometrías de carácter complejo como bifurcaciones, meandros, canales, presas e incluso áreas urbanas. IBER tiene disponibles módulos integrados que permiten modelar transporte de sedimentos, calidad del agua, procesos morfodinámicos, análisis de riesgos por inundación y también comportamiento hidráulico de estructuras. Sumado a esto, se complementa con QGIS facilitando la preparación de modelos, integración de cartografía y el análisis espacial de resultados (Vera Ruiz, 2015). Es por esto que estas propiedades lo ubican como un instrumento de gran precisión y aplicabilidad para estudios hidrológicos e hidráulicos complejos, como en necesidad académicos como para uso de consultorías y entidades públicas.

3.4.1. HEC-RAS

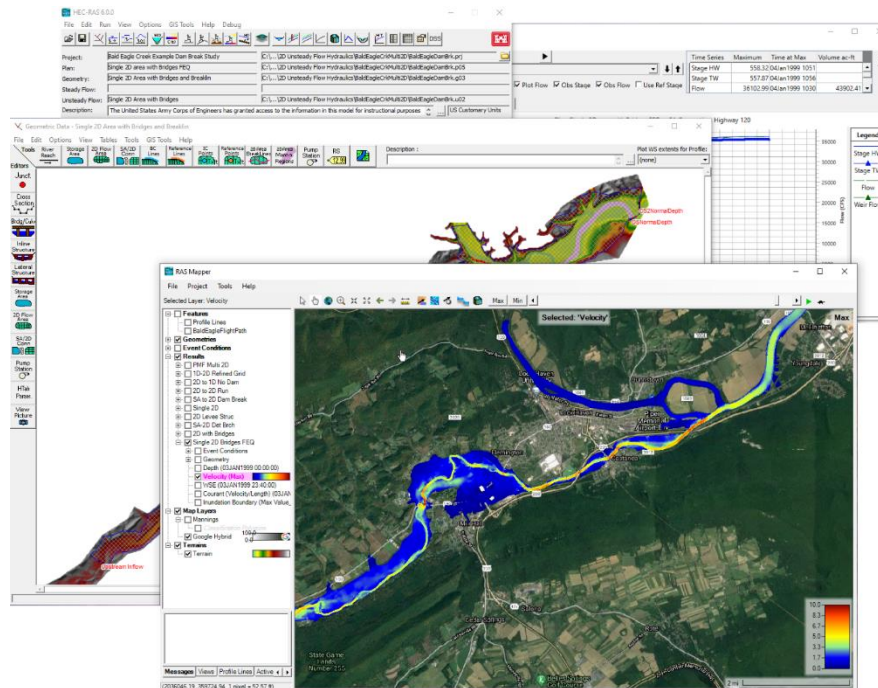
HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) es una herramienta computacional desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, desarrollada para realizar análisis hidráulicos unidimensionales y bidimensionales en sistemas de canales abiertos y cauces naturales. Uno de sus objetivos principales se encuentra en recrear la dinámica del flujo de agua en condiciones permanentes y no permanentes, De esta forma, proporciona un entorno completo para realizar modelación de inundaciones, diseño de obras hidráulicas junto con evaluación del comportamiento de ríos por medio de distintos contextos de intervención o eventos extremos (Orellana Cabello, 2021).

Este software está basado en la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant (ecuaciones de conservación de la masa y del momento) usando mecanismos numéricos como lo son diferencias finitas implícitas y explícitas. Dentro de su modalidad 1D, facilita analizar el perfil del flujo en canales y ríos, teniendo en proceso estructuras como puentes, alcantarillas, presas, vertederos y compuertas. Dentro de su modalidad 2D, permite en versiones más actuales, el modelo opera sobre una malla computacional lo cual permite simular con mejor detalle fenómenos como lo son desbordamientos, interacción entre cauces y planicies de inundación, junto con flujos en zonas urbanas o topografías altamente complejas (Osorio, 2016).

La herramienta HEC-RAS se integra con otras como SIG, HEC-GeoRAS y ArcGIS, facilitando la digitalización de geometrías, apropiación de propiedades hidráulicas del terreno, y la entrega de resultados georreferenciados, adicional a esto ofrece funciones complejas como el estudio del transporte de sedimentos, simulación de calidad del agua y evaluación del comportamiento de presas y embalses, por medio de su interfaz gráfica, sumándole su amplia documentación técnica y su comunidad global de usuarios que mejoran su sistema de información, convierten a HEC-RAS en una de las herramientas mejor utilizadas para la práctica profesional y académica respecto al análisis hidráulico de ríos y canales.

Figura 1

Interfaz gráfica de HEC-RAS con resultados de simulación 2D



Nota: Captura de pantalla donde visualiza la interfaz de HEC-RAS, donde se encuentra la visualización de resultados de una simulación bidimensional sobre un mapa georreferenciado (Engineers., 2023).

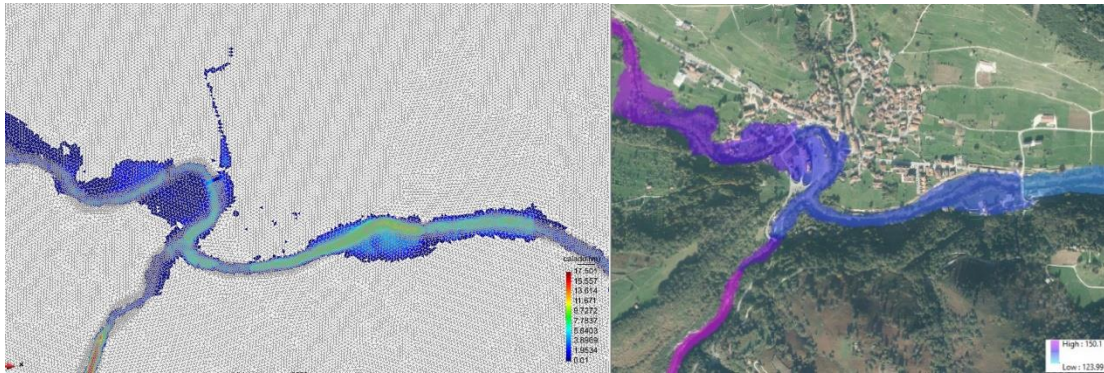
3.4.2. IBER

IBER es considerado un modelo numérico bidimensional creado de forma conjunto por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (España), junto con la Universidad de La Coruña y la Universidad Politécnica de Cataluña, este software se orienta a la simulación de flujos superficiales en lámina libre, usando una formulación bidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant (Conocidas de otra forma como ecuaciones de aguas poco profundas). Su alcance de aplicación aborda estudios referentes a la inundabilidad, análisis de avenidas, transporte de

sedimentos, diseño y evaluación de obras hidráulicas, flujos urbanos y calidad del agua en medios fluviales.

IBER resalta debido a su capacidad de plasmar con una mejorable resolución espacial la dinámica de los flujos sobre áreas topográficamente complejas, mediante la aplicación del método de volúmenes finitos sobre una malla no estructurada. Por medio de este enfoque se facilita capturar fenómenos hidráulicos importantes como lo es bifurcaciones, propagación de ondas de choque, zonas de recirculación y flujos sobre estructuras hidráulicas. Adicional IBER trae consigo modelos los cuales logran simular casos de transporte de contaminantes, evolución morfológica de cauces junto con cálculo de indicadores de hábitat fluvial, convirtiéndose así en una integral herramienta para lograr un análisis hidráulico y ambiental completo.

Entre sus valores agregados más importantes se encuentra su interfaz gráfica, la cual facilita la construcción del modelo geométrico, definición de condiciones de contorno junto con la entrega de resultados por medio de mapas de velocidades, tirantes, calados y demás parámetros hidráulicos. IBER cuenta con una libre distribución encontrando respaldo por diferentes instituciones académicas y gubernamentales, garantizando su actualización y mejora continua junto con un acceso a una amplia documentación técnica y confiable. Su ámbito de aplicación es particularmente útil para proyectos sobre planificación y gestión del riesgo por inundaciones, análisis de impacto ambiental junto con modelación de eventos extremos, ubicándose como una herramienta muy versátil para la ingeniería hidráulica actual.⁴

Figura 2*Interfaz gráfica de IBER*

Nota. Captura de pantalla en la que se observa la interfaz de IBER, donde se incluye la vista de la geometría del modelo y la asignación de condiciones de contorno en un entorno georreferenciado (CursosGIS., 2017).

4. Aplicación de las Herramientas Computacionales HEC-RAS e IBER

4.1. Herramientas HEC-RAS

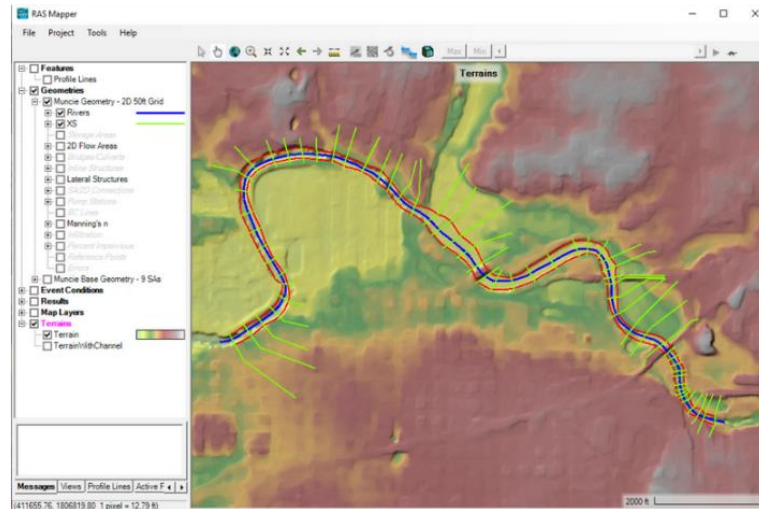
La aplicación de HEC-RAS en el ámbito de la modelación hidráulica bidimensional es representativo como avance importante respecto a la simulación de los comportamientos del flujo superficial, especialmente en áreas las cuales se encuentran expuestas a inundaciones y cauces naturales. Este software ha tenido diferentes mejoras hasta poder incluir herramientas de un carácter potente como lo es RAS Mapper, el cual facilita la integración de sistemas de información geográfica (SIG) respecto a la definición geométrica del modelo.

4.1.1. *Modelo del Terreno*

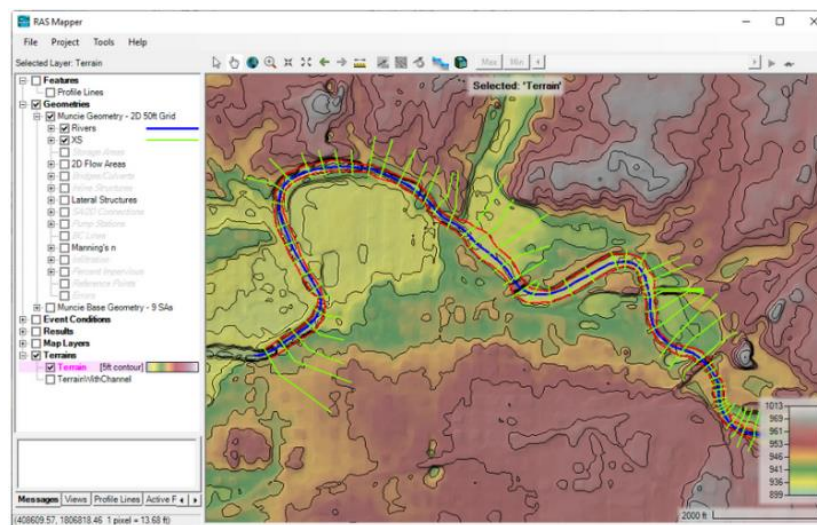
HEC-RAS 5.0, a través de RAS Mapper, permite la integración de modelos digitales del terreno (MDT) georreferenciados por medio de archivos de proyección compatibles con ArcGIS, a topografía se puede adecuar a múltiples formatos, entre los más comunes se encuentra el formato ESRI ASCII Grid, donde de forma posterior es convertido a GeoTIFF buscando mejorar su velocidad de procesamiento. Por medio de este entorno logra la superposición de mapas base como ortofotos, mapas topográficos y callejeros, favoreciendo así tanto la definición del dominio hidráulico como su validación visual en los diferentes resultados.

Figura 3

Modelo digital del terreno (MDT) mostrado en 3D con sombreado topográfico - Parte 1

**Figura 4**

Modelo digital del terreno (MDT) mostrado en 3D con sombreado topográfico - Parte 2



Nota. Estas imágenes representan la visualización del MDT en RAS Mapper para la definición geométrica del terreno en un modelo hidráulico bidimensional. Tomado de Manual del usuario de HEC-RAS 2D. Desarrollo de un modelo de terreno y capas geoespaciales (Engineers, 2025).

La realización de la malla computacional, la cual es esencial para la modelación 2D, puede desarrollarse con celdas no estructuradas de hasta ocho lados. No obstante, HEC-RAS actualmente no facilita la edición directamente de la elevación de los puntos de la malla a través su interfaz, sin embargo, se pueden usar herramientas externas adicionales que permitan realizar este ajuste de datos topográficos.

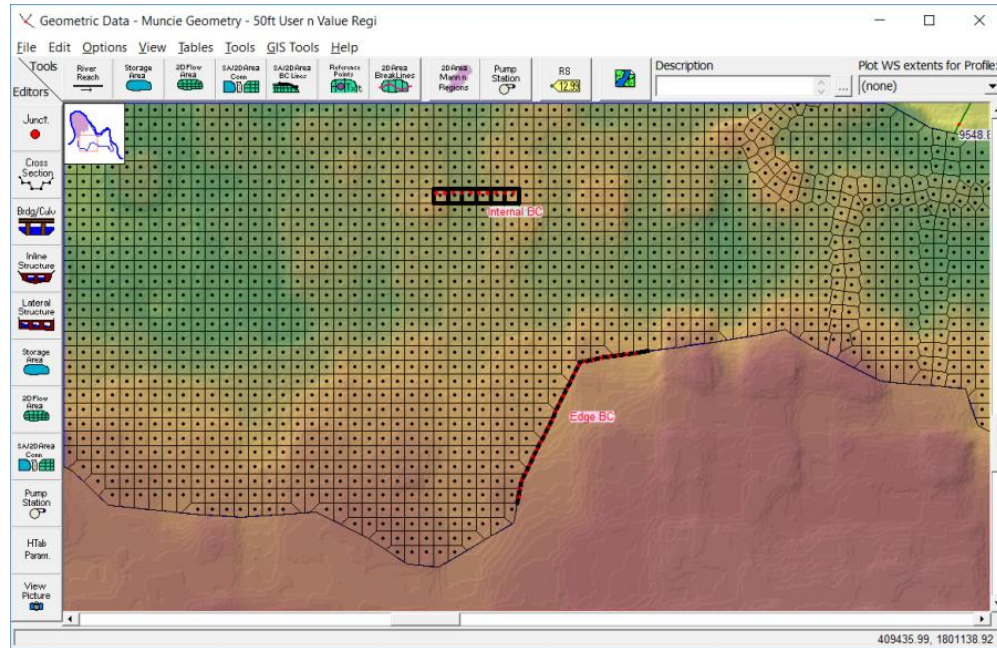
4.1.2. Condiciones de Contorno y Rugosidades

El software facilita la definición de múltiples condiciones de contorno para el ingreso y salida del flujo, como lo son los hidrogramas de caudal o de calado, estas condiciones se realizan por medio de líneas sobre la malla bidimensional, lo que facilita la asignación a las celdas correspondientes, aquellas condiciones iniciales, como lo es la cota de lámina de agua, son también una forma de establecerse al inicio de la simulación.

Con respecto a las rugosidades, HEC-RAS logra su definición manual mediante polígonos en RAS Mapper, o por medio de la importación de capas externas en formato shapefile (*.shp), resultado de esta forma particularmente útil en modelos extensos con variabilidad topográfica y de cobertura del terreno.

Figura 5

Definición de condiciones de contorno en un área de flujo 2D dentro de HEC-RAS



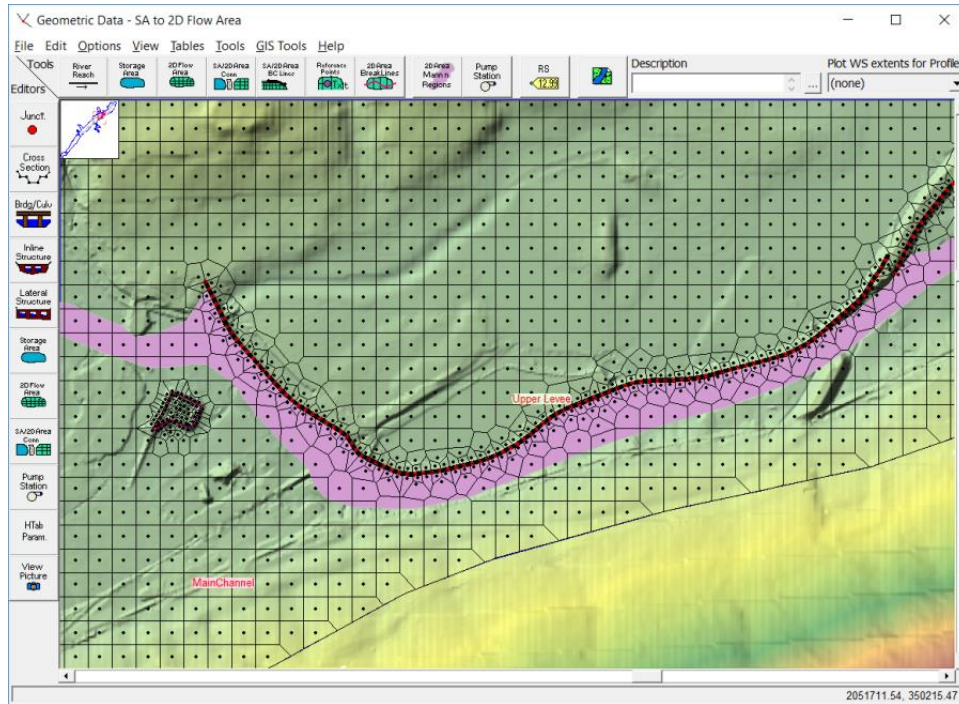
Nota. Se observa cómo se delimita la entrada y salida de flujo en la malla bidimensional con el fin de simular diferentes escenarios hidráulicos. Tomado de (Engineers., 2023)

4.1.3. Incorporación de Estructuras

Referente a estructuras hidráulicas, la herramienta HEC-RAS permite incluir diferentes elementos como lo son compuertas, alcantarillas e incluso vertederos dentro del modelo bidimensional. Si bien es cierto aún hay diferentes limitaciones en la simulación directa de puentes en mallas 2D, representarlos si es posible por medio de configuraciones alternativas como múltiples alcantarillas. Es por esto, que estos elementos estructurales necesitan una definición de geometría, rugosidad y coeficientes de pérdida de carga para lograr una correcta simulación.

Figura 6

Simulación de estructuras hidráulicas, como puentes o compuertas, en áreas de flujo 2D



Nota. La imagen refiere la incorporación de estructuras hidráulicas en el modelo bidimensional donde evalúa su influencia sobre el flujo. Tomado de (Engineers 2023)

4.1.4. Flexibilidad del Modelo y Proceso de Cálculo

Alguna de los valores agregados que destacan de HEC-RAS refiere a su competencia para lograr resolver diferentes modelos de ecuaciones en flujos superficiales, entre aquellas se encuentran las ecuaciones de Saint-Venant y las de onda difusa, en función del grado de complejidad necesario. Las ecuaciones de onda difusa son recomendadas para lograr simulaciones de forma rápida y estables para grandes extensiones, en tanto las de Saint-Venant entregan una mejor precisión para contextos con dinámicas complejas.

Adicional, el software tolera la integración de modelos 1D-2D, como puede ser simular un río en 1D y al mismo tiempo llanuras de inundación en 2D, esto permite optimizar recursos computacionales sin requerir limitar u obviar la precisión en áreas críticas. Es por esto que el parámetro clave para estas simulaciones es aquel denominado como el paso de tiempo computacional (time step), donde interviene de forma directa en la estabilidad, precisión junto con el tiempo de ejecución del modelo.

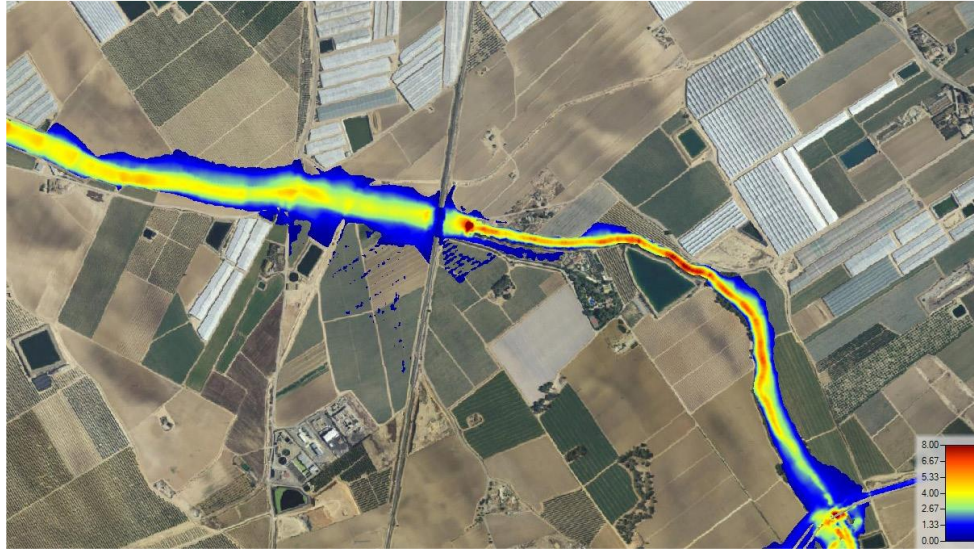
4.1.5. Presentación de Resultados

Respecto a los resultados de la simulación, estos son entregados de una forma visual por medio de RAS Mapper, lo cual permite visualizar mapas de calado, velocidad y elevación de la lámina de agua. HEC-RAS también logra animar el avance del flujo y a su vez, generar mapas de valores máximos alcanzados en cada variable.

Adicional, mantiene diferentes simulaciones de forma simultánea, permitiendo así, realizar comparaciones gráficas directas entre distintos escenarios. Adicional, permite generar perfiles longitudinales personalizados en los cuales es posible visualizar las diferentes variables más importantes, y por ende facilita su análisis hidráulico. Por último, los resultados que presenta es posible que sean exportados para diferentes usos, como procesamiento o visualización en otros programas SIG, de esta forma amplía la interoperabilidad del modelo con otras plataformas de análisis espacial.

Figura 7

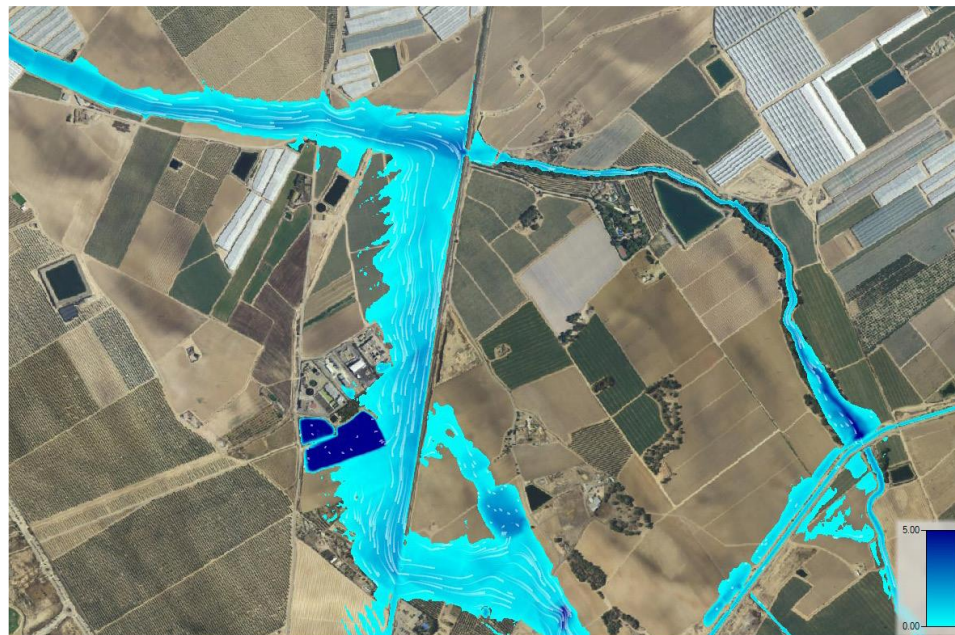
Visualización en RAS Mapper de velocidades del agua



Nota. Tomado de Herramientas de Modelización Hidráulica, WSP (2024)

Figura 8

Visualización en RAS Mapper de calados con traza de partículas



Nota. Tomado de Análisis de Herramientas de Modelización Hidráulica, WSP (2024)

4.2. Herramientas IBER

El software IBER resalta como una herramienta la cual se especializa en la simulación del flujo de agua dentro de un régimen libre por medio de modelos hidráulicos bidimensionales (2D). Su aplicación logra la evaluación de una forma precisa fenómenos hidráulicos de carácter complejo en cauces naturales o artificiales, incorporando diferentes componentes importantes para un análisis completo. A continuación, se describe las funcionalidades claves que IBER logra aplicar:

4.2.1. Modelo del Terreno

La simulación hidráulica en IBER inicia desde el desarrollo de un modelo tridimensional del terreno, el cual puede crearse por medio de diversos formatos de archivos, donde resaltan IGES, STEP, DXF, SHAPEFILE, puntos XYZ, archivos raster GDAL, y de forma especial aquellos modelos digitales del terreno (MDT). De acuerdo a la necesidad del estudio y del nivel de detalle deseado, puede discretizarse el terreno por medio de una malla regular con celdas cuadradas o incluso en una malla irregular que se base en triángulos (RTIN). Así mismo IBER permite diseñar mallas heterogéneas, en la cual contenga diferentes densidades de nodos de acuerdo a las zonas de interés, de esta forma optimizando la precisión del modelo sin necesitar incrementar de una forma innecesaria su carga computacional.

De un mismo modo, permite la incorporación de ortofotos georreferenciadas que dan apoyo visual para generar una interpretación del terreno, esto mejora la adición de las características físicas del modelo, permitiendo una representación espacial más correcta de aquellos elementos del área de estudio.

4.2.2. Condiciones de Contorno y Rugosidad del Terreno

Una adecuada definición respecto a las condiciones de contorno junto con sus iniciales es crucial al momento de una simulación hidráulica. IBER logra integrar curvas de caudal o niveles de agua en el tiempo dentro de sus condiciones de entrada, junto con condiciones subcríticas o incluso supercríticas para las salidas definidas, aplicándose de una forma directa a los bordes de la malla, es por esto que el software cuenta con una herramienta de visualización que permite facilitar adecuadamente su correcta selección, evitando errores de asignación.

Respecto a su rugosidad del terreno, IBER entrega un sistema automático de asignación por medio de archivos raster los cuales representan el uso del suelo. Por medio de códigos asignados de una forma previa a cada celda de la malla, es posible definir valores distintos de coeficiente de rugosidad (como los de Manning), de esta forma se mejora la precisión del modelo presente, por esto es importante que se cuente con una base de datos SIG la cual previamente haya sido transformada a formato raster.

4.2.3. Estructuras

IBER permite incluir múltiples tipos de estructuras hidráulicas, como las compuertas, vertederos, diques, cubiertas, puentes y alcantarillas, de forma particular para una modelación de puentes, se cuenta con tres métodos de acuerdo al nivel requerido de detalle: (i) la función del tablero como condicional interna, esta es práctica para estructuras pequeñas; (ii) la introducción de forma detallada de geometría de las pilas que se encuentran directas en la malla, esta es adecuada para aquellos modelos que cuenten con alta resolución; y (iii) la herramienta concreta denominada “Puente”, la cual concede una integración semiautomática y simplificada, la cual es recomendada para grandes modelos.

A su vez, las alcantarillas son modeladas como aquellos elementos los cuales transportan entre dos puntos caudal, considerando su geometría y rugosidad, pese a que no incluye pérdidas por emboquilles.

4.2.4. Flexibilidad del Modelo y Cálculo

Dentro de las principales fortalezas del software IBER se encuentra su flexibilidad para lograr modificar las cotas del terreno, ya que el usuario tiene la capacidad de ajustar elementos considerados como individuales de la malla o incluso modificar recintos completos por medio de nuevos MDT, de esta forma permite la simulación de obras proyectadas como lo son motas, terraplenes o encauzamientos, esta característica la hace particularmente útil en aquellos contextos en el cual se estudian interacciones humanas sobre el cauce.

Sin embargo, es importante tenerse en cuenta que los tiempos de simulación crecen de una forma considerable de acuerdo al tamaño del modelo, incluso puede llegar a superar las 24 horas en estudios que sean complejos, por esto es recomendable usar mallas heterogéneas, concentrando una mayor densidad de nodos en aquellas áreas catalogada como de una mayor relevancia hidráulica.

Dentro de las características avanzadas destacan la herramienta de “Vía de Intenso Desagüe”, estas lograr delimitar áreas en las cuales no se permite el paso del flujo. Siendo útil esta herramienta para poder analizar la sobrelevación de la lámina de agua, cumpliendo parámetros internacionales como los establecidos en el Real Decreto 9/2008, donde regulan consideraciones del dominio público hidráulico en España.

4.2.5. Presentación de Resultados

IBER brinda una importante gama de resultados hidráulicos, como lo es el calado, velocidad, cota de agua, número de Froude, caudal específico, energía, y peligrosidad de acuerdo

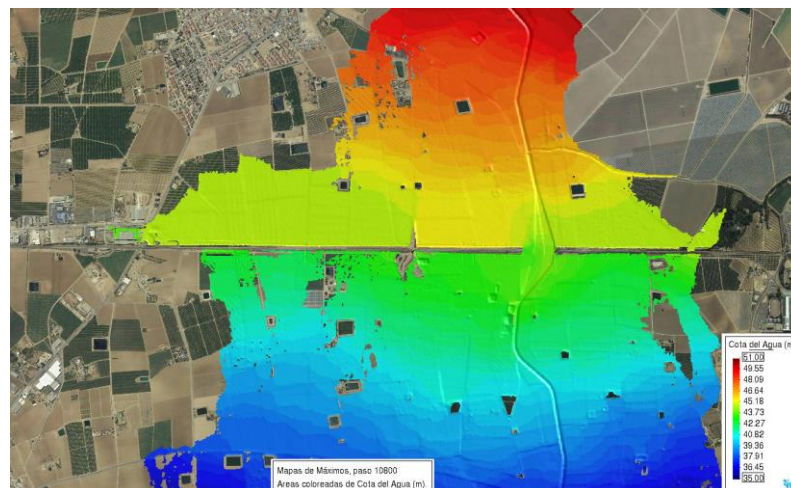
a la normativa. Estos hallazgos se producen por medio formato raster, las cuales estan asociadas a ubicaciones geográficas clara junto a diferentes tiempos respecto a la simulación, permitiendo estudiar de una forma dinámica la evolución del flujo y visualización de escenarios extremos por medio mapas de máximos.

Estos resultados tienen la capacidad de exportarse como imágenes o archivos compatibles con Sistemas de Información Geográfica (SIG), posibilitando el análisis externo, junto con el módulo de visualización en el cual permite el desarrollo de animaciones en formatos GIF, AVI, FLV o MPEG, junto con gráficas de evolución de variables, siendo la última función un poco menos intuitiva.

A causa de la gran cantidad de datos que tiene la capacidad de generar IBER, es indispensable disponer de espacio suficiente para su almacenamiento junto con capacidad de procesamiento, particularmente en modelos que cuenten con una importante extensión.

Figura 9

Visualización en el módulo de postproceso de IBER



Nota. Visualización en el módulo de postproceso de IBER del mapa de máximos para valores de cota del agua, tomado de WSP (2024).

4.3. Comparación de las Herramientas Computacionales HEC-RAS e IBER

Las herramientas computacionales HEC-RAS (2D) e IBER usadas de forma amplia para la modelación hidráulica en cauces naturales y zonas de inundación, es sabido que permiten la simulación bidimensional del flujo, sin embargo, ambos cuentan con sustanciales diferencias referente a su enfoque, capacidades, limitaciones e incluso requisitos técnicos. Es por esto que se pretende comparar sus principales características:

4.3.1. Facilidad de Uso y Entorno Gráfico

HEC-RAS resalta debido a su interfaz amigable junto con la eficiencia de su módulo RAS Mapper, el cual facilita generar modelos de una forma rápida, editar geometrías, aplicar condiciones de contorno y así mismo visualizar resultados de una forma sencilla, esta funcionalidad garantiza que HEC-RAS sea atractivo para usuarios que inicien de forma principiante, o aquellos que necesiten tiempos de modelación más cortos.

Contrario, IBER cuenta con una curva de aprendizaje más técnico el cual cuenta con una interfaz más técnica, ofreciendo un mayor control y detallismo en la edición de la malla y la entrega de propiedades del terreno, es por esto que su entorno se orientado más a usuarios que cuenten con experiencia en modelación y análisis SIG.

4.3.2. Flexibilidad del Modelo y Edición del Terreno

Entre las principales ventajas que ofrece IBER en comparación con HEC-RAS trata sobre su importante flexibilidad al momento de modificar la malla y la cota del terreno, facilitando expresar obras hidráulicas como lo son motas, encauzamientos, diques o diferentes

infraestructuras sin requerir iniciar completamente este modelo, esta característica de edición interna del terreno permite interacciones rápidas a lo largo del periodo de diseño.

Caso contrario, en HEC-RAS, independiente de los cambios en la geometría del terreno o la malla permite contar con herramientas externas, limitando su adaptabilidad para poder crear modificaciones complejas y demás interactivas, como lo es el análisis de escenarios alternativos rápidamente.

4.3.3. *Modelación de Estructuras*

IBER cuenta con diferentes opciones mejores y más complejas para la modelación de estructuras hidráulicas, desde puentes, compuertas y alcantarillas, con diferentes grados de detalle de acuerdo al objetivo de estudio planteado. Convirtiéndolo así en una herramienta mejor adecuada para proyectos en el cual las estructuras cuenten con un papel crucial para la dinámica del flujo.

HEC-RAS, aunque cuenta con la capacidad de combinar modelos 1D y 2D para una mejor representación de algunas condiciones hidráulicas, cuenta con limitaciones para la representación de puentes en mallas bidimensionales, la cual puede disminuir la confianza del modelo en áreas urbanas o aquellas que cuenten con infraestructura crítica.

4.3.4. *Postproceso y Análisis de Resultados*

IBER cuenta con una gama mucho más amplia de conjuntos hidráulicos en su módulo de postproceso, donde se incluye la generación de forma automática de mapas de peligrosidad de acuerdo al Real Decreto 9/2008 junto a los criterios de la Agencia Catalana del Agua (ACA), siendo especialmente práctico para estudios dirigidos en el manejo del riesgo de inundaci.

De igual forma, HEC-RAS cuenta con la capacidad comparar diferentes simulaciones al tiempo en su entorno de trabajo, siendo un componente que IBER solo puede realizarlo exportando resultados a software externos de SIG, esto dificulta realizar una comparación directa entre escenarios.

4.3.5. *Requisitos Computacionales*

Una importante desventaja de IBER se caracteriza por la gran demanda de recursos de procesamiento y almacenamiento, particularmente en modelos de gran y alta resolución. Lo que puede significar largos tiempos de simulación junto con menos fluidez para edición del modelo, por su lado HEC-RAS es relativamente más liviano en expresiones de requerimientos computacionales, haciéndolo más eficiente para aquellos modelos preliminares o incluso para usuarios con restricciones referentes a la capacidad de hardware.

5. Conclusiones

Dentro del análisis comparativo entre las herramientas computacionales IBER y HEC-RAS usada para la modelación hidráulica bidimensional ha logrado observar diferentes fortalezas y debilidades las cuales se deben tener en cuenta en el momento de seleccionar la herramienta mejor capacitada de acuerdo a las necesidades y características del estudio a desarrollar. IBER es considerada una herramienta que se especializa en modelación hidráulica bidimensional, la cual resalta por su capacidad de representar de forma precisa estructuras hidráulicas complejas (puentes, diques, encauzamientos) al mismo tiempo por su módulo de postproceso el cual genera mapas detallados de calado, velocidad, peligrosidad, y demás valores. Al mismo tiempo permite modificar la topografía junto a la malla directamente en los ambientes de modelación, siendo ideal para el análisis de escenarios alternativos en zonas de flujo complejo. Todo lo anterior se respalda por documentación técnica y estudios entre otros, como el Manual de Usuario de IBER v2.0 y trabajos de Castro Orgaz et al. (2022).

Por su parte, HEC-RAS, es considerada por su versatilidad desde su versión 5.0 en la cual contiene modelación 2D. Su interfaz RAS Mapper facilita la creación de mallas, ejecutar simulaciones y realizar comparaciones de escenarios de una forma directa sin necesidad de un software adicional, agilizando de esta forma el trabajo. Es cierto que tiene algunas limitaciones para representar estructuras complejas, sin embargo, es adecuado para estudios preliminares, como zonas con flujos unidimensionales o para usuarios que estén iniciando y cuenten con menor experiencia, entendiendo su facilidad al momento del uso, ampliando su documentación como los manuales oficiales del USACE.

Inicialmente se resuelve que IBER es una herramienta capacitada y detallada, especialmente es adecuada para simulación de áreas complejas de inundación, en las cuales el

flujo es presentado como un comportamiento bidimensional y en la cual es necesario representar de una forma precisa estructuras hidráulicas como puentes, encauzamientos, diques y obras de protección. Su flexibilidad a la hora de editar la malla y modificar la topografía directamente dentro del contexto de modelación le otorga una importante capacidad para el análisis de escenarios alternativos. Adicional el módulo de postproceso de IBER facilita la generación de diferentes variedades de salidas, donde se incluyen características críticas como lo es el calado, velocidad, energía, peligrosidad y resultados máximos, los cuales son esenciales para la gestión de amenazas hidrológicas y el desarrollo de soluciones estructurales.

Aunque se evidenció que el gran consumo de recursos computacionales de IBER trae consigo un limitante importante respecto a términos de eficiencia operativa, particularmente para modelos que tengan un gran tamaño. Simultáneamente, la imposibilidad de comparar escenarios de una forma directa en su ambiente fuerza a realizar exportaciones a software SIG externo, generando un riesgo de dificultar el flujo de trabajo.

De otra forma, HEC-RAS resalta por su facilismo al momento del uso junto con su entorno gráfico fácilmente intuitivo, convirtiéndolo en una recomendable opción respecto a estudios preliminares, proyectos con flujos predominantemente unidimensionales o usos más básicos con menor experiencia. La herramienta RAS Mapper permite el desarrollo de modelos, visualización de resultados y realizar una comparación directa con múltiples simulaciones, de esta manera optimizando los tiempos de análisis.

Aunque HEC-RAS cuenta con limitaciones relevantes respecto a la representación de estructuras complejas, entre los que se encuentran puentes sobre mallas 2D, restringiéndole su aplicabilidad en escenarios urbanos o de alta complejidad geométrica, adicional cuenta con la

capacidad de modificar directamente la cota del terreno desde el ambiente del modelo, reduciendo así su flexibilidad frente a interacciones de diseño.

En conclusión, al momento de seleccionar una herramienta, esta debe dar respuesta a necesidades específicas del estudio, como la clase de fenómeno a modelar, la complejidad del área de interés junto con los recursos que se encuentren disponibles (técnicos, humanos y computacionales). En cambio, HEC-RAS entrega una mejor agilidad y accesibilidad, IBER por otro lado entrega una mejor precisión y profundidad técnica para estudios que necesiten detalladamente una representación del fenómeno hidráulico

6. Recomendaciones

Se recomienda que, en el desarrollo de futuros trabajos de modelación hidráulica bidimensional y en la aplicación de herramientas computacionales en ingeniería civil, se priorice la obtención y verificación rigurosa de los datos de entrada, asegurando su calidad y representatividad mediante fuentes confiables y, cuando sea posible, validaciones en campo. Asimismo, es fundamental que los profesionales y estudiantes mantengan una formación continua en el uso de tecnologías y metodologías actualizadas, participando activamente en programas de capacitación y actualización que permitan una adecuada interpretación y aplicación de los resultados. Finalmente, se sugiere realizar análisis bajo diferentes escenarios y condiciones, manteniendo una actitud crítica frente a los resultados obtenidos y considerando las limitaciones inherentes a las herramientas utilizadas, con el fin de optimizar la toma de decisiones y promover la mejora continua en los procesos de planificación y gestión de recursos hídricos. También fomentar la integración interdisciplinaria y el uso de tecnologías emergentes en el análisis y gestión de fenómenos hidráulicos. La colaboración entre distintas áreas del conocimiento, como la ingeniería civil, la hidrología, la climatología y la gestión ambiental, permite abordar los desafíos hidráulicos de manera integral, considerando tanto los aspectos técnicos como los impactos sociales y ambientales. Asimismo, la incorporación de herramientas digitales avanzadas, tales como sistemas de información geográfica, sensores remotos y plataformas de código abierto, contribuye a una mejor comprensión y representación de los procesos hídricos, facilitando la toma de decisiones informadas y sostenibles en la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura hidráulica.

Referencias

- Auersch, L. R. (2014). *Respuesta dinámica de edificaciones producida por campos de ondas incidentes considerando la interacción suelo-estructura. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 30(4),. Obtenido de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-34982006000100018&script=sci_arttext&tlng=en
- Bonilla et al, G. C. (2024). *Introducción al modelado hidráulico: conceptos básicos y herramientas avanzadas (EPANET, EPA SWMM, HEC-RAS)*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Brav, C. (s. f.). *Capítulo 2 Ecuaciones de Navier-Stokes. Fenómenos turbulentos 2.1. Ecuaciones de Navier-Stokes 2.1.1. Introducción*. https://www.academia.edu/40505131/Cap%C3%ADtulo_2_Ecuaciones_de_Navier_Stokes_Fen%C3%B3menos_Turbulentos_2_1_Ecuaciones_de_Navier_Stokes_2_1_1_Introducci%C3%B3n
- Castellet, E. B. (2006). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=6694>
- Castro, M. P. (2015). *Desenvolvimento de uma metodologia fuzzy, aplicada no modelo da onda difusa, para estudar o comportamento da propagação de ondas de cheias, em funções de parâmetros hidráulicos nas suas formas fuzzys*. Obtenido de <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/13009>

- Cea, L. V.-C. (2019). *El método de volúmenes finitos aplicado a problemas de ingeniería fluvial y costera. La Gaceta de la RSME*, 12(1), 71-93. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Luis-Cea/publication/267479046_The_finite-volume_method_applied_to_river_and_coastal_engineering_problems/links/60c5a07fa6fdcc2e613bfdbf/The-finite-volume-method-applied-to-river-and-coastal-engineering-problems.pdf
- Chaudhry, M. H. (12 de 02 de 2024). *open-channel-flow*. Obtenido de [open-channel-flow-by-m-hanif-chaudhry-wwww-civilengforall-com.pdf](https://www.researchgate.net/publication/351111111_open-channel-flow-by-m-hanif-chaudhry-wwww-civilengforall-com-pdf)
- Cristiana Di Cristo a, M. I. (2018). *Aplicabilidad de modelos cinemáticos y difusivos para flujos de lodo: un análisis de estado estacionario*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418300921>
- Cuervo Muñoz, A. E. (2012). *Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya)*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/14736>
- CursosGIS. (2017). *Simulación hidráulica con Iber y visualización de resultados en ArcGIS*. Obtenido de <https://www.cursosgis.com/simulacion-hidraulica-con-iber-y-visualizacion-de-resultados-en-arccgis/>
- Engineers., U. A. (2023). *HEC-RAS Main Screen. Recuperado de* <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Obtenido de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

- Foronda-Gutiérrez, L. A.-G.-M. (2022). *Evaluación de herramientas computacionales para análisis de sistemas fotovoltaicos. Ingeniería y competitividad*, 24(2). Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30332022000200014&script=sci_arttext
- Franco Díaz, A. &. (2020). *Modelación climática: necesidades en México y tendencias. Clima cambiante: una aproximación geográfica para México.-(Colección Pública Geografía; 3)*, 23-47. Obtenido de <https://www.torrossa.com/gs/resourceProxy?an=5162514&publisher=FZQ596>
- Hitt, F. (2017). *El aprendizaje del cálculo y nuevas tendencias en su enseñanza en el aula de matemáticas. Eco matemático*, 6-15. Obtenido de <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ecomatematico/article/view/1374>
- Ledesma, A. C. (2015). *Introducción al método de diferencias finitas y su implementación computacional. Bernal, Facultad de Ciencias, UNAM*. Obtenido de <https://www.academia.edu/download/66174242/IntroduccionAlMetodoDeDiferenciasFinitasYSuImplementacionComputacional.pdf>
- M. J. Lighthill, F. a. (M. J. Lighthill, F.R.S. and G. B. Whitham). *On kinematic waves I. Flood movement in long rivers*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://courses.physics.ucsd.edu/2018/Fall/physics218a/Whitham_Lighthill_Kinematic%20Waves%201.pdf
- Madroñal, C. P. (2019). *Estudio de diversos tipos de condiciones de contorno para las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles*. Obtenido de Doctoral dissertation, Universidad de Málaga): <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=13219>
- Madroñal, P. (1989). *Estudio de diversos tipos de condiciones de contorno para las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles (Doctoral dissertation, Universidad de Málaga)*.

Obtenido de

<https://portaldelainvestigacion.uma.es/documentos/624bbdcbe9790a3dbd042d8b>

Mathews, J. &. (2000). *Métodos Numéricos*. Madrid: Prentice Hall. Obtenido de

https://www.academia.edu/download/51073502/Parte_1_Metodos_Numericos_con_MATLAB_-_Mathews-Fink-_3ra._ed..pdf

Métodos numéricos para ingenieros (Vol. 5, p. 1.-1.-H. (2011). Chapra, S. C., Canale, R. P.,

Ruiz, R. S. G., Mercado, V. H. I., Díaz, E. M., & Benites, G. E. Obtenido de

https://www.academia.edu/download/60841296/Libro_Metodos_Numericos_con_MATLAB_-_Jo20191008-83264-1q8wqqm.pdf

Mora, L. O. (2018). *Empleo de herramientas computacionales para la modelación de una red*.

Revista Arquitectura e Ingeniería, 12(2), 5. Obtenido de

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6548144>

Orellana Cabello, R. E. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de*

inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS. Obtenido de

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/PUCP_680d4a181367a36513c8eec35ede15f0

Osorio, W. C. (2016). *Modelación hidrologico-hidraulica de eventos de inundacion en el Rio*

Bogotá (sector tocanzipa-chia) usando HEC-RAS. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 7(2).

Palacio, E. T. (2018). *Desarrollo del pensamiento geométrico a partir del uso de estrategias*

didácticas soportadas en herramientas computacionales y el modelo Van Hiele.

Assensus, 3(4), 49-59. Obtenido de

<https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/assensus/article/view/1835>

- Rincón, J. P. (2017). *Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes*. *Gaceta Técnica*, 17(1), 9-28. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/5703/570376605006.pdf>
- Rodríguez, E. A. (2007). *Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del Río Las Ceibas (Neiva-Huila)*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1450/145016872006.pdf>
- Saucedo, H. F. (2005). *El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 2. Acoplamiento numérico para la fase de avance en el riego por melgas*. *Tecnología y ciencias del agua*, 20(2), 109-119. Obtenido de <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1041>
- Sinighn, V. P. (2019). *kinematic wave modeling in water resources*. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=O9nEOnZYUwC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Vera Ruiz, D. A. (2015). *Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca alta del Río Bogotá, en el Municipio de Villapinzón, utilizando modelación hidrológica HEC-HMS e hidráulica 1D y 2D HEC-RAS e ÍBER (Doctoral dissertation, Maestría en Ingen.* Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/186>
- Zhan, C. (2025). *Solución de la propagación compleja de ondas de inundación mediante una red neuronal con base física basada en coeficientes divididos*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169425001738>
- Zimmermann, E. D. (2000). *Adaptación del modelo de Onda cinemática a los sistemas hidrológicos de llanura*. *Universidad Nacional Rosario*, 19. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/10/Cna2000NUE.pdf>

- Auersch, L. R. (2014). Respuesta dinámica de edificaciones producida por campos de ondas incidentes considerando la interacción suelo-estructura. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, 30(4),. Obtenido de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-34982006000100018&script=sci_arttext&tlng=en
- Bonilla et al, G. C. (2024). Introducción al modelado hidráulico: conceptos básicos y herramientas avanzadas (EPANET, EPA SWMM, HEC-RAS). Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Castellet, E. B. (2006). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=6694>
- Castro, M. P. (2015). Desenvolvimento de uma metodologia fuzzy, aplicada no modelo da onda difusa, para estudar o comportamento da propagação de ondas de cheias, em funções de parâmetros hidráulicos nas suas formas fuzzys. Obtenido de <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/13009>
- Cea, L. V.-C. (2019). El método de volúmenes finitos aplicado a problemas de ingeniería fluvial y costera. La Gaceta de la RSME, 12(1), 71-93. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Luis-Cea/publication/267479046_The_finite-volume_method_applied_to_river_and_coastal_engineering_problems/links/60c5a07fa6fdcc2e613bfdbf/The-finite-volume-method-applied-to-river-and-coastal-engineering-problems.pdf

- Chaudhry, M. H. (12 de 02 de 2024). open-channel-flow. Obtenido de open-channel-flow-by-m-hanif-chaudhry-www-civilenggforall-com.pdf
- Cristiana Di Cristo a, M. I. (2018). Aplicabilidad de modelos cinemáticos y difusivos para flujos de lodo: un análisis de estado estacionario. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418300921>
- Cuervo Muñoz, A. E. (2012). Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/14736>
- CursosGIS. (2017). Simulación hidráulica con Iber y visualización de resultados en ArcGIS. Obtenido de <https://www.cursosgis.com/simulacion-hidraulica-con-iber-y-visualizacion-de-resultados-en-arccgis/>
- Engineers., U. A. (2023). HEC-RAS Main Screen. Recuperado de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Obtenido de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Foronda-Gutiérrez, L. A.-G.-M. (2022). Evaluación de herramientas computacionales para análisis de sistemas fotovoltaicos. Ingeniería y competitividad, 24(2). Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-30332022000200014&script=sci_arttext
- Franco Díaz, A. &. (2020). Modelación climática: necesidades en México y tendencias. Clima cambiante: una aproximación geográfica para México.-(Colección Pública Geografía; 3), 23-47. Obtenido de <https://www.torrossa.com/gs/resourceProxy?an=5162514&publisher=FZQ596>

- Hitt, F. (2017). El aprendizaje del cálculo y nuevas tendencias en su enseñanza en el aula de matemáticas. Eco matemático, 6-15. Obtenido de <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/ecomatematico/article/view/1374>
- Ledesma, A. C. (2015). Introducción al método de diferencias finitas y su implementación computacional. Bernal, Facultad de Ciencias, UNAM. Obtenido de <https://www.academia.edu/download/66174242/IntroduccionAlMetodoDeDiferenciasFinitasYSuImplementacionComputacional.pdf>
- Luisyep. (2023, 9 junio). *Las ecuaciones de Navier-Stokes*. <https://ingenieriabasica.es/las-ecuaciones-de-navier-stokes/>
- M. J. Lighthill, F. a. (M. J. Lighthill, F.R.S. and G. B. Whitham). On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://courses.physics.ucsd.edu/2018/Fall/physics218a/Whitham_Lighthill_Kinematic%20Waves%201.pdf
- Madroñal, C. P. (2019). Estudio de diversos tipos de condiciones de contorno para las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles. Obtenido de Doctoral dissertation, Universidad de Málaga): <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=13219>
- Madroñal, P. (1989). Estudio de diversos tipos de condiciones de contorno para las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles (Doctoral dissertation, Universidad de Málaga). Obtenido de <https://portaldelainvestigacion.uma.es/documentos/624bbdcbe9790a3dbd042d8b>
- Mathews, J. &. (2000). Métodos Numéricos. Madrid: Prentice Hall. Obtenido de https://www.academia.edu/download/51073502/Parte_1_Metodos_Numericos_con_MATLAB_-_Mathews-Fink-_3ra._ed..pdf

- Métodos numéricos para ingenieros (Vol. 5, p. 1.-1.-H. (2011). Chapra, S. C., Canale, R. P., Ruiz, R. S. G., Mercado, V. H. I., Díaz, E. M., & Benites, G. E. Obtenido de https://www.academia.edu/download/60841296/Libro_Metodos_Numericos_con_MATLAB_-_Jo20191008-83264-1q8wqqm.pdf
- Mora, L. O. (2018). Empleo de herramientas computacionales para la modelación de una red. Revista Arquitectura e Ingeniería, 12(2), 5. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6548144>
- Orellana Cabello, R. E. (2021). Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/PUCP_680d4a181367a36513c8eec35ede15f0
- Osorio, W. C. (2016). Modelación hidrológico-hidráulica de eventos de inundación en el Río Bogotá (sector tocanzipa-chia) usando HEC-RAS. Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo, 7(2).
- Palacio, E. T. (2018). Desarrollo del pensamiento geométrico a partir del uso de estrategias didácticas soportadas en herramientas computacionales y el modelo Van Hiele. Assensus, 3(4), 49-59. Obtenido de <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/assensus/article/view/1835>
- Rincón, J. P. (2017). Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes. Gaceta Técnica, 17(1), 9-28. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/5703/570376605006.pdf>
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación hidráulica 2D de inundaciones en regiones con escasez de datos. El caso del delta del río ranchería, Riohacha-

- Colombia. Información tecnológica, 29(4), 143-156.
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000400143&script=sci_arttext
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelacion hidraulica 2D de inundaciones en regiones con escasez de datos. El caso del delta del rio rancheria, Riohacha-Colombia. Información tecnológica, 29(4), 143-156.
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000400143&script=sci_arttext
- Ramírez-López, P. A., & Velasco-Mateus, K. D. (2019). Modelación hidrológica a la cuenca El Hato (Cundinamarca) comparando los diferentes resultados de pérdidas por infiltración utilizando la herramienta computacional HEC-HMS.
<https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/23947>
- Rios Marquez, D. F., & Colan Peña, F. M. Análisis y Propuesta de Medidas de Protección en el Río Chillón: Aplicación de Modelamiento 2D y concepto de Capacidad Hidráulica.
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/674784>
- Rodríguez, E. A. (2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del Río Las Ceibas (Neiva-Huila). Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1450/145016872006.pdf>
- Rodríguez, M. L. G. (2019). Construcción del concepto de variación con apoyo de una herramienta computacional. Innovación Educativa, 9(48), 19-25.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Kf71DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Herramientas+Computacionales+HEC&ots=CZdF0FdByj&sig=9slSG7x5elj-xGUxT5A1XYZY4fs>
- Salinas-Tapia, H., Mejía, A. A., Lara, J. B., Aragón, J. G., López-Rebollar, B. M., & Narvaez-Saucedo, M. (2018). ESTIMACIÓN DE ZONAS DE ALTO RIESGO EROSIVO EN

RÍOS PEQUEÑOS, UTILIZANDO UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL.

https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_440.pdf

Saucedo, H. F. (2005). El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 2. Acoplamiento numérico para la fase de avance en el riego por melgas.

Tecnología y ciencias del agua, 20(2), 109-119. Obtenido de

<https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1041>

Sinigh, V. P. (2019). kinematic wave modeling in water resources. Obtenido de

[https://books.google.com.co/books?id=-](https://books.google.com.co/books?id=-O9nEOnZYUwC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

[O9nEOnZYUwC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=-O9nEOnZYUwC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Utexas.edu. Recuperado el 10 de junio de 2025, de

<https://www.caee.utexas.edu/prof/maidment/grad/tate/research/rasexercise/webfiles/hecras.htm>