UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

TESIS:

Análisis de la influencia de la resolución del modelo digital de terreno en la simulación de inundaciones con HEC-RAS e IBER, valle Antacucho - Ayacucho 2025

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:
Bach. Maycol ESPINO CAYLLAHUA

ASESOR:
M.Sc. César Vidal GUTIÉRREZ NINAHUAMÁN

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta etapa importante de mi vida.

A mi madre Victoria, por cuidarme y protegerme cuando aún no podía hacerlo por mí mismo, y por seguir acompañándome y guiándome desde el otro lado de la vida hasta el día de hoy.

A mis abuelitos Valentín y Lucía, por su cariño, consejos y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi madre Juana, por darme la vida y brindarme siempre su esfuerzo y dedicación.

Y a todos mis amigos y familiares, por concederme el honor de formar parte de sus vidas y por motivarme en los momentos más difíciles, impulsándome a superar cada obstáculo hasta alcanzar este logro académico.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente, contribuyendo al desarrollo de mis conocimientos y capacidades.

Expreso mi especial agradecimiento a mi asesor de tesis, M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán, por su constante orientación, apoyo y asesoramiento durante el desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, agradezco a los miembros del jurado de tesis: Ph.D. Sandra Del Águila Ríos, Ing. Efraín Chuchón Prado y Dr. Eleazar Chuchón Angulo, por sus valiosos comentarios, observaciones y aportes académicos que contribuyeron al fortalecimiento de la presente tesis.

Mi profundo agradecimiento a mi familia y seres queridos, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación permanente en los momentos más difíciles, impulsándome a seguir adelante hasta alcanzar este logro académico.

Finalmente, agradezco a mis amigos Rómulo, Juan, Mayumi, Victor y compañeros de aula que contribuyeron y me acompañaron durante esta etapa de mi formación profesional.

RESUMEN

El modelamiento hidráulico bidimensional constituye una herramienta fundamental para la evaluación de inundaciones, cuya confiabilidad depende, entre otros factores, de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de la malla computacional. La presente investigación tuvo como objetivo analizar la influencia de la resolución del MDT y del tamaño de malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER en el valle Antacucho – Ayacucho. La metodología consistió en desarrollar modelos hidráulicos utilizando cinco resoluciones del MDT y cinco tamaños de malla, generando un total de 50 simulaciones. La evaluación se realizó mediante el Índice de Convergencia de Malla (GCI), el orden de convergencia, la relación de convergencia asintótica y las variables hidráulicas profundidad máxima, velocidad máxima y área inundada, además del tiempo de procesamiento y el costo computacional. Los resultados evidenciaron que, en HEC-RAS, los MDT de 1,3 y 4 m presentaron una convergencia más cercana al régimen asintótico, mientras que el MDT de 5 m mostró comportamiento oscilatorio y menor consistencia numérica. En IBER, el MDT de 3 m presentó una convergencia más consistente y mejor adaptación a la geometría del terreno. Asimismo, la profundidad y el área inundada mostraron un comportamiento más consistente que la velocidad máxima, la cual resultó ser la variable más sensible a la discretización espacial. Las simulaciones en IBER demandaron, en promedio, 5,49 veces más tiempo de procesamiento que HEC-RAS, mientras que aumentar el tamaño de malla de 1×1 m a 2×2 m redujo el tiempo de procesamiento en 82,63 %, sin afectar significativamente la consistencia de los resultados. Se concluye que un MDT de 3 m y una malla de 2×2 m ofrecen el mejor equilibrio entre estabilidad numérica, representación hidráulica y eficiencia computacional para la modelación bidimensional de inundaciones en el valle de Antacucho.

Palabras clave: Modelamiento hidráulico bidimensional; Modelo Digital del Terreno (MDT); Mallas estructuradas; Mallas no estructuradas; Convergencia numérica; Estabilidad numérica; Eficiencia computacional; HEC-RAS; IBER.

ABSTRACT

Two-dimensional hydraulic modeling is a fundamental tool for flood assessment; its reliability depends on factors such as the resolution of the Digital Terrain Model (DTM) and the size of the computational mesh. This study aimed to analyze the influence of DTM resolution and mesh size on 2D flood simulations using HEC-RAS 2D and IBER in the Antacucho valley (Ayacucho). The methodology involved developing hydraulic models using five DTM resolutions and five mesh sizes, resulting in a total of 50 simulations. Evaluation was based on the Grid Convergence Index (GCI), order of convergence, asymptotic convergence ratio, and hydraulic variables—specifically maximum depth, maximum velocity, and flooded area—alongside processing time and computational cost. Results showed that in HEC-RAS, 1 m, 3 m, and 4 m DTMs exhibited convergence closer to the asymptotic regime, whereas the 5 m DTM displayed oscillatory behavior and lower numerical consistency. In IBER, the 3 m DTM demonstrated more consistent convergence and better adaptation to the terrain geometry. Furthermore, depth and flooded area showed more consistent behavior than maximum velocity, which proved to be the variable most sensitive to spatial discretization. On average, IBER simulations required 5.49 times more processing time than HEC-RAS, while increasing the mesh size from 1×1 m to 2×2 m reduced processing time by 82.63% without significantly affecting result consistency. It is concluded that a 3 m DTM and a 2×2 m mesh offer the best balance between numerical stability, hydraulic representation, and computational efficiency for 2D flood modeling in the Antacucho valley.

Keywords: Two-dimensional hydraulic modeling; Digital Terrain Model (DTM); Structured meshes; Unstructured meshes; Numerical convergence; Numerical stability; Computational efficiency; HEC-RAS; IBER.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA ii
AGRADECIMIENTO iii
RESUMEN iv
ABSTRACT v
ÍNDICE GENERAL vi
ÍNDICE DE FIGURAS x
ÍNDICE DE TABLAS xii
INTRODUCCIÓN 1
OBJETIVOS 2
OBJETIVO GENERAL 2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2
CAPITULO I 3
MARCO TEÓRICO 3
1.1. ANTECEDENTES 3
1.1.1. A nivel mundial 3
1.1.2. A nivel nacional, regional y local 4
1.2. BASES TEÓRICAS 4
1.2.1. Modelo digital de terreno (MDT) 4
1.2.1.1. Influencia de la resolución del MDT en la simulación hidráulica bidimensional 5
1.2.2. Máximas avenidas 6
1.2.2.1. Importancia de las máximas avenidas. 6
1.2.3. Rugosidad 6
1.2.4. Modelación de inundaciones bidimensional (2D) 8
1.2.5. Dinámica de fluidos computacional. 9
1.2.6. Ecuación de Saint-Venant 2D 9
1.2.7. Métodos numéricos y estructuras de malla en modelación hidráulica 11
1.2.7.1. Métodos numéricos 11

1.6.2.2. Discretización Espacial 12
1.2.8. Número de Courant....14
1.2.9. Método del índice de convergencia de malla (GCI) 15
1.2.10. Costos incrementales de convergencia de malla. 16
CAPITULO II 18
MATERIALES Y METODOLOGÍA....18
2.1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO 18
2.1.1. Zona de estudio 18
2.1.2. Ubicación política....19
2.1.3. Ubicación geográfica....19
2.1.4. Limites 19
2.1.5. Accesibilidad....22
2.1.6. Clima de la zona de estudio 22
2.1.7. Topografía de la zona de estudio: 22
2.1.8. Uso de suelo....23
2.2. MATERIALES Y EQUIPOS....24
2.2.1. Materiales y equipos en campo....24
2.2.2. Materiales y equipos en oficina 25
2.2.3. Programa de ingeniería....25
2.3. METODOLOGÍA 25
2.3.1. Método de investigación....25
2.3.2. Tipo de investigación 26
2.3.3. Nivel de investigación 26
2.3.4. Diseño de investigación 26
2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS 26
2.4.1. Técnicas 26
2.4.2. Instrumentos 27
2.5. LA POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO DE PROYECTO 27
2.5.1. Población 27

2.5.2. Muestra 27
2.6. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN 27
2.6.1. MDT (Modelo digital del terreno) 27
2.6.1.1. Planificación del levantamiento aerofotogramétrico 27
2.6.1.2. Trabajo de campo en el levantamiento Aero fotogramétrico 28
2.6.1.3. Puntos de control 29
2.6.1.4. Procesamiento del MDT en Agisoft Metashape 30
2.6.1.5. Exportación de resultados 31
2.6.2. Datos hidrológicos de caudal máximo 31
2.6.3. Rugosidad en el rio Cachi. 32
2.6.4. Modelamiento Hidráulico en HEC-RAS 33
2.6.4.1. Plan de simulaciones a realizarse 33
2.6.4.2. Diagrama de metodología 35
2.6.4.3. Preproceso 37
2.6.4.4. Proceso 38
2.6.4.5. Post-proceso 41
2.6.5. Modelamiento hidráulico bidimensional en IBER. 42
2.6.5.1. Plan de simulaciones a realizarse 42
2.6.5.2. Diagrama de metodología 44
2.6.5.3. Preproceso 46
2.6.5.4. Proceso 48
2.6.5.5. Post-proceso 52
2.6.6. Análisis de convergencia de malla 52
2.6.7. Análisis de costos incrementales computacionales 53
CAPITULO III 54
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 54
3.1. Elaboración de modelos hidráulicos 54
3.1.1. Malla estructurada en HEC-RAS 54
3.1.2. Malla no estructurada en IBER. 54

3.2. Resultados Hidráulicos de las simulaciones 57
3.2.1. Resultados de mallas estructuradas - HEC-RAS 57
3.2.2. Resultados de mallas no estructuradas – IBER 60
3.3. Evaluación de las características hidráulicas. 63
3.3.1. Análisis de convergencia del modelo en calado 63
3.3.2. Análisis de convergencia del modelo en velocidad 66
3.3.3. Análisis de convergencia del modelo en área de inundación. 69
3.3.4. Análisis comparativo de secciones transversales. 72
3.4. Evaluación de tiempo de procesamiento 77
3.4.1. Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas 77
3.4.2. Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas 78
3.4.3. Comparación de tiempo de procesamiento IBER HEC-RAS 79
3.5. Evaluación de costo computacional. 81
3.6. Evaluación comparativa de la resolución del MDT. 82
CAPITULO IV 84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 84
4.1. Conclusiones 84
4.2. Recomendaciones 85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86
ACRÓNIMOS 90
GLOSARIO 91
ANEXOS: 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Discretización de un dominio* 12
Figura 2 *Malla estructurada* 13
Figura 3 *Esquema de malla no estructurada* 14
Figura 4 *Vista principal de la zona de estudio* 18
Figura 5 *Mapa departamental del proyecto* 20
Figura 6 *Mapa provincial del proyecto* 20
Figura 7 *Mapa distrital del proyecto* 21
Figura 8 *Zona de intervención de la tesis* 21
Figura 9 *Topografía de la zona de estudio vista aérea.* 23
Figura 10 *Modelo Digital de Terreno (MDT)* 23
Figura 11 *Cobertura vegetal de la zona de estudio* 24
Figura 12 *Planificación del vuelo en el valle de Antacucho* 28
Figura 13 *Vista aérea del valle Antacucho.* 29
Figura 14 *Puntos de control dejados en el terreno* 29
Figura 15 *Caudal máximo por TR para la cuenca Cachi.* 32
Figura 16 *Valores de coeficiente de rugosidad (n)* 33
Figura 17 *Diagrama de metodología para mallas estructuradas* 36
Figura 18 *Usos de suelo asignado en HEC-RAS* 38
Figura 19 *Interfaz de análisis de flujo no permanente* 39
Figura 20 *Ecuación de cómputo en HEC-RAS* 40
Figura 21 *Ajuste de número de Courant en HEC-RAS* 40
Figura 22 *Herramienta de "Unsteady Flow Analysis"* 41
Figura 23 *Visualización de resultados en HEC-RAS* 42
Figura 24 *Diagrama de metodología para mallas no estructuradas* 45
Figura 25 *Geometría del área de estudio* 46
Figura 26 *Usos de suelo asignado en IBER* 48
Figura 27 *Esquema Numérico Seleccionado* 49
Figura 28 *Parámetros de Tiempo en IBER* 50
Figura 29 *Parámetros Generales en IBER* 51
Figura 30 *Proceso de simulación en IBER* 51
Figura 31 *Post-proceso en IBER* 52
Figura 32 *Malla estructurada* 54
Figura 33 *Malla no estructurada 1x1* 55
Figura 34 *Malla no estructurada 3x3* 56
Figura 35 *Malla no estructurada 5x5* 56

Figura 36 *Relación de convergencia asintótica de mallas de calado máximo*.....65
Figura 37 *Relación de convergencia asintótica de mallas de Velocidad máxima*.....68
Figura 38 *Relación de convergencia asintótica de mallas de Área inundada*.....72
Figura 39 *Seccionamiento del modelo*.....73
Figura 40 *Sección transversal 1 en malla estructurada* 73
Figura 41 *Sección transversal 2 en malla estructurada* 74
Figura 42 *Sección transversal 3 en malla estructurada* 74
Figura 43 *Sección transversal 1 en malla no estructurada* 75
Figura 44 *Sección transversal 2 en malla no estructurada* 76
Figura 45 *Sección transversal 3 en malla no estructurada* 76
Figura 46 *Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas*...80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Valores del coeficiente de rugosidad (n)* 6
Tabla 2 *Límite del distrito de San José de Ticllas* 19
Tabla 3 *Vías de acceso para llegar hacia la zona de estudio* 22
Tabla 4 *Puntos de control tomadas en campo* 30
Tabla 5 *Parámetros de Procesamiento* 31
Tabla 6 *Modelo digital de terreno (MDT)* 31
Tabla 7 *Plan de simulaciones con mallas estructuradas* 34
Tabla 8 *Tamaño de malla y número de elementos de mallas estructuradas* 37
Tabla 9 *Características de la computadora* 39
Tabla 10 *Plan de simulaciones con mallas no estructuradas* 43
Tabla 11 *Tamaño de malla y número de elementos* 47
Tabla 12 *Características de la computadora* 49
Tabla 13 *Resultados de calado en mallas estructuradas* 57
Tabla 14 *Resultados de velocidad en mallas estructuradas* 58
Tabla 15 *Resultados de área inundada en mallas estructuradas* 59
Tabla 16 *Resultados de calado en mallas no estructuradas* 60
Tabla 17 *Resultados de velocidad en mallas no estructuradas* 61
Tabla 18 *Resultados de área inundada en mallas no estructuradas* 62
Tabla 19 *Índice de convergencia de mallas de calado en mallas estructuradas* 63
Tabla 20 *Índice de convergencia de mallas del calado en mallas no estructuradas* 64
Tabla 21 *Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas estructuradas* 66
Tabla 22 *Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas no estructuradas* ..67
Tabla 23 *Índice de convergencia de mallas de área en mallas estructuradas* 69
Tabla 24 *Índice de convergencia de mallas de área en mallas no estructuradas* 70
Tabla 25 *Variación de cota en mallas estructuradas* 75
Tabla 26 *Variación de cota en mallas no estructuradas* 77
Tabla 27 *Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas* 77
Tabla 28 *Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas* 79
Tabla 29 *Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas* 80
Tabla 30 *Costo computacional de refinamiento en mallas no estructuradas* 81
Tabla 31 *Costo computacional de refinamiento en mallas estructuradas* 81
Tabla 32 Evaluación comparativa de la resolución del MDT. 82

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los eventos de inundación han generado significativos impactos sociales, económicos y ambientales, especialmente en zonas vulnerables como los valles interandinos del Perú. La modelación hidráulica se ha consolidado como una herramienta fundamental para la prevención y gestión de riesgos de inundación, permitiendo simular escenarios de flujo y estimar áreas potencialmente afectadas bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más recurrentes y de mayores consecuencias a nivel mundial, afectando vidas humanas, infraestructura, producción agrícola y el equilibrio ambiental (Smith & Ward, 1998). En zonas como el valle Antacucho – Ayacucho, caracterizado por su topografía montañosa y su alta variabilidad climática, los eventos de inundación representan un riesgo latente, especialmente en periodos de lluvias intensas y crecidas súbitas.

La confiabilidad de las simulaciones hidráulicas bidimensionales depende de la resolución del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del tamaño de la malla computacional, ya que ambos influyen en la representación de la topografía y en variables como la profundidad, la velocidad del flujo, la extensión de la inundación y el tiempo de procesamiento. Los modelos HEC-RAS 2D e IBER permiten desarrollar estas simulaciones mediante mallas estructuradas y no estructuradas, por lo que resulta necesario evaluar la influencia de estas configuraciones en los resultados hidráulicos y en la eficiencia computacional, especialmente en cuencas con relieve complejo como el valle Antacucho.

Frente a esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del tamaño de la malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER, utilizando mallas estructuradas y no estructuradas, respectivamente, en el valle Antacucho – Ayacucho. Para ello, se evaluarán parámetros hidráulicos como la profundidad máxima, la velocidad máxima, el área inundada y el tiempo de procesamiento, considerando diferentes resoluciones del MDT y tamaños de malla. Los resultados permitirán establecer criterios técnicos sobre la influencia de estas variables en el comportamiento de los modelos hidráulicos y en su eficiencia computacional, contribuyendo a la selección de configuraciones adecuadas para estudios de inundación en zonas con características similares.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER, en el valle Antacucho – Ayacucho, 2025.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Elaborar y simular modelos hidráulicos a diferentes resoluciones del modelo digital de terreno (MDT) haciendo el uso de las mallas estructuradas (HEC -RAS) y mallas no estructuradas (IBER).
2) Comparar y evaluar las características hidráulicas y el tiempo de procesamiento por cada modelo hidráulico elaborado a distintas resoluciones del modelo digital de elevaciones (MDT).
3) Identificar la resolución del MDT, el tamaño de malla y el modelo hidráulico que presenten el mejor equilibrio entre la consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. A nivel mundial

Morales et al. (2018) compararon los resultados de simulaciones de inundación en zonas urbanas usando HEC-RAS e IBER, encontrando diferencias en la extensión de las áreas inundadas y en los valores de velocidad y profundidad, atribuibles en gran parte al tratamiento de la geometría del terreno y la forma de discretización de las mallas.

Según Horritt & Bates (2001), la resolución espacial del MDT tiene un impacto significativo en la estimación del área inundada y los tirantes de agua, especialmente en terrenos planos o con relieves suaves, donde pequeñas diferencias en elevación pueden alterar los patrones de flujo.

Por su parte, Bladé et al. (2014) estudiaron el efecto de diferentes resoluciones topográficas en IBER, observando que resoluciones demasiado bajas tienden a subestimar los niveles de agua y la extensión de inundación, mientras que resoluciones excesivamente altas no necesariamente aportan mejoras significativas después de cierto umbral, pero sí incrementan el costo de procesamiento.

Huxley et al. (2022) realizaron una investigación sobre la convergencia del tamaño de celda en modelos hidráulicos bidimensionales, evaluando diferentes resoluciones de malla y su influencia en los resultados hidráulicos. Los autores concluyeron que el refinamiento de malla mejora la precisión de los resultados; sin embargo, incrementa significativamente el costo computacional. Además, demostraron que existe una resolución intermedia donde los resultados alcanzan estabilidad numérica sin necesidad de continuar refinando la discretización espacial.

Abily et al. (2016) analizaron la influencia de la resolución espacial del Modelo Digital de Elevación (DEM) en modelos hidráulicos bidimensionales mediante un análisis global de sensibilidad. Los autores concluyeron que la resolución de discretización espacial constituye uno de los factores con mayor influencia en la variabilidad de los resultados hidráulicos, afectando directamente la representación de inundaciones y el tiempo computacional.

1.1.2. A nivel nacional, regional y local

Orellana (2021) desarrolló una investigación orientada al análisis de inundaciones en la ciudad de Piura mediante la integración de modelos hidrológicos e hidráulicos empleando HEC-HMS y HEC-RAS. El estudio permitió determinar áreas susceptibles a inundación y evaluar el comportamiento hidráulico del flujo ante eventos extremos, demostrando la importancia del modelamiento numérico para la gestión del riesgo de inundaciones.

Sierra (2018) desarrolló un modelamiento hidráulico bidimensional en flujo no permanente del río Pativilca utilizando herramientas numéricas para analizar la dinámica hidráulica y la propagación de inundaciones. Los resultados evidenciaron la utilidad de los modelos bidimensionales para representar con mayor precisión la distribución espacial del flujo.

Canchari (2023)realizó una comparación entre IBER y HEC-RAS para determinar áreas inundables. El estudio concluyó que ambos modelos permiten representar adecuadamente las zonas de inundación; sin embargo, presentan diferencias en la representación hidráulica y en la respuesta numérica de los parámetros simulados.

Fernández (2016) desarrolló una investigación sobre el comportamiento bidimensional del río Cachi en los sectores de Laramate y Santiago de Pischa. El estudio empleó modelación hidrológica e hidráulica para estimar caudales de diseño y determinar manchas de inundación para diferentes periodos de retorno, evidenciando la importancia del modelamiento bidimensional para la evaluación de riesgos de inundación.

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. Modelo digital de terreno (MDT)

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una representación digital tridimensional de la superficie terrestre desnuda, es decir, del relieve natural del suelo sin incluir objetos sobre él como vegetación, edificaciones o infraestructuras (Li et al., 2004)

Cada punto del MDT está definido por sus coordenadas horizontales (X, Y) y una cota o elevación (Z) referida a un datum vertical. Se genera a partir de datos obtenidos por sensores remotos como LIDAR, fotogrametría aérea, imágenes satelitales o mediciones de campo.

1.2.1.1. Influencia de la resolución del MDT en la simulación hidráulica bidimensional.

El Modelo Digital del Terreno (MDT) constituye la principal fuente de información topográfica utilizada en los modelos hidráulicos bidimensionales, ya que define la elevación del terreno sobre la cual se resuelven las ecuaciones de aguas someras. En consecuencia, la resolución espacial del MDT influye directamente en la representación de la superficie del terreno y, por tanto, en la precisión de los resultados hidráulicos obtenidos (Cook & Merwade, 2009).

Las modificaciones en la representación topográfica generan cambios directos en los principales parámetros hidráulicos obtenidos mediante los modelos numéricos. En este contexto el calado puede variar debido a las diferencias en la elevación del terreno; la velocidad del flujo se ve afectada por las alteraciones en la pendiente hidráulica y en la configuración geométrica del cauce; mientras que la extensión de la inundación depende de la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente las trayectorias de propagación del flujo y las áreas de almacenamiento superficial del agua.

Según Cook & Merwade (2009) el desarrollo de los sistemas de información geográfica, la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), la tecnología LiDAR y el incremento de la capacidad computacional han favorecido la utilización de modelos bidimensionales de alta resolución. La disponibilidad de Modelos Digitales del Terreno (MDT) con resoluciones métricas o submétricas permite representar con mayor detalle la topografía del terreno, mejorando la caracterización de los gradientes hidráulicos y de la conectividad entre el cauce principal y las planicies de inundación

Su precisión depende directamente de la resolución espacial: mientras más fina sea la resolución (por ejemplo, 1 m), mayor nivel de detalle topográfico es capturado (Schumann et al., 2007).

Según Merwade et al. (2008) resoluciones inadecuadas pueden generar errores acumulativos en la simulación de la extensión de inundación, en especial en regiones con alta variabilidad topográfica.

1.2.2. Máximas avenidas

Las máximas avenidas (también conocidas como crecidas máximas o caudales máximos) son los mayores caudales que puede generar una cuenca hidrográfica durante un evento hidrometeorológico extremo. Estas avenidas pueden ser resultado de lluvias intensas, deshielos rápidos, rupturas de embalses, o combinaciones de varios factores.

Según Chow & Maidment (1998) El mayor caudal instantáneo o medio que se espera ocurra durante un periodo dado, asociado a un determinado período de retorno.

1.2.2.1. Importancia de las máximas avenidas.

El cálculo de las máximas avenidas es fundamental para:

- Diseño de presas, vertederos, canales y puentes.
- Planificación de defensas ribereñas y estructuras de protección contra inundaciones.
- Zonificación de áreas de riesgo.
- Evaluación de seguridad de infraestructuras existentes.
- Modelación hidráulica de inundaciones.

1.2.3. Rugosidad

La rugosidad en cauces naturales corresponde a la oposición que generan el lecho y las orillas del río al paso del agua, debido a elementos como piedras, gravas, vegetación, sedimentos e irregularidades presentes en el cauce. Este factor tiene una influencia importante en la velocidad, profundidad y comportamiento del flujo hidráulico, y generalmente se expresa mediante el coeficiente de Manning (n).

La rugosidad en canales naturales depende de las irregularidades superficiales, vegetación, alineamiento del cauce y obstrucciones presentes en el flujo (Chow, 1994).

Tabla 1

Valores del coeficiente de rugosidad (n)

Tipo de canal y descripción	mínimo	normal	máximo
D. Corrientes naturales			
D-1 Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente <100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033

2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080

4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (>100 pies)			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025		0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

Nota. Se muestra los coeficientes de rugosidad para corrientes naturales (Chow, 1994).

1.2.4. Modelación de inundaciones bidimensional (2D)

Los modelos 2D de inundación resuelven las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, considerando la variabilidad del flujo en todas las direcciones (Teng et al., 2017). A diferencia de los modelos 1D, los modelos 2D pueden representar mejor los procesos de desbordamiento, expansión lateral de flujos y acumulación de agua en zonas bajas (Horritt & Bates, 2001).

Entre los aspectos relevantes destacan:

- Las condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo.
- Los coeficientes de rugosidad de Manning (n).
- Los datos hidrometeorológicos empleados.

La correcta representación topográfica es clave para simular adecuadamente procesos de inundación (Apel et al., 2009).

Según (Chaudhry, 2008; U.S. Army Corps of Engineers, 2025), los modelos hidráulicos bidimensionales se fundamentan en la resolución numérica de las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant o ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations, SWE), las cuales representan la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento bajo el supuesto de presión hidrostática y predominio de las dimensiones horizontales respecto a la profundidad del flujo. Estas ecuaciones permiten estimar variables hidráulicas de interés como la profundidad del agua, la velocidad, el esfuerzo cortante y la extensión de la inundación, constituyendo la base matemática de programas ampliamente utilizados en ingeniería hidráulica, tales como HEC-RAS 2D e IBER.

1.2.5. Dinámica de fluidos computacional.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran el flujo de fluidos. CFD permite simular el comportamiento de los fluidos y sus interacciones con superficies y estructuras mediante el uso de computadoras.

La CFD es el arte de reemplazar las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo de fluidos con números y avanzar estos números en el espacio y/o el tiempo para obtener una descripción numérica final del campo de flujo (Versteeg & Malalasekera, 2007).

1.2.6. Ecuación de Saint-Venant 2D

Los modelos hidráulicos bidimensionales se fundamentan en la resolución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, también denominadas ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations, SWE). Estas ecuaciones describen el movimiento del flujo superficial mediante la aplicación de los principios de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento en las direcciones horizontal longitudinal (x) y transversal (y), permitiendo representar la distribución espacial del flujo en ríos, quebradas y planicies de inundación (Chaudhry, 2008; U.S. Army Corps of Engineers, 2025).

Las ecuaciones de Saint-Venant se derivan a partir de las ecuaciones de Navier–Stokes mediante un conjunto de simplificaciones físicas que permiten representar adecuadamente el comportamiento del flujo en canales abiertos. Entre las principales hipótesis se considera que el fluido es incompresible, la presión presenta una distribución hidrostática, la profundidad del flujo es pequeña respecto a las dimensiones horizontales del dominio y las aceleraciones verticales son despreciables. Bajo estas condiciones, las ecuaciones permiten describir con suficiente precisión la propagación de ondas de inundación y la interacción del flujo con la topografía del terreno (Chaudhry, 2008).

Las ecuaciones de Saint-Venant constituyen el fundamento teórico de los modelos hidráulicos bidimensionales modernos utilizados para la simulación del flujo a superficie libre. Software especializado como HEC-RAS 2D e IBER resuelve estas ecuaciones mediante diferentes técnicas de discretización numérica, permitiendo estimar parámetros hidráulicos como el calado, la velocidad del flujo, la elevación de la lámina de agua, el esfuerzo cortante sobre el lecho y la extensión de las áreas inundadas.

En forma conservativa, las ecuaciones bidimensionales pueden expresarse mediante la ecuación de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento en las direcciones x e y.

- **Ecuación de Continuidad.**

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = q \quad \text{.....(Ec. 1)}$$

Donde q representa el aporte o perdida de agua por cada metro cuadrado de terreno del dominio calculado.

La ecuación de continuidad representa el principio de conservación de masa, garantizando que el agua se conserve durante la simulación hidráulica, de modo que no se crea ni se elimina artificialmente dentro del modelo.

En la presente investigación, la variación del agua dentro del dominio depende principalmente del caudal impuesto en la condición de entrada y del flujo que se propaga a través del terreno representado por el MDT, ya que no se consideraron aportes distribuidos como precipitación o infiltración.

- **Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección x.**

Esta ecuación representa la conservación de la cantidad de movimiento en la dirección longitudinal del flujo, considerando los efectos de la pendiente del terreno, la presión hidrostática y la fricción ejercida por el fondo del cauce.

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + \frac{\partial (huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial z}{\partial x} - \tau fx \quad \text{.....(Ec. 2)}$$

- **Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección y.**

Esta ecuación expresa la conservación de la cantidad de movimiento en la dirección transversal del flujo, permitiendo representar adecuadamente cambios de dirección, expansión lateral de la inundación y circulación sobre planicies.

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t}+\frac{\partial(huv)}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2+\frac{1}{2}gh^2\right)=-gh\frac{\partial z}{\partial y}-\tau fy \quad \text{.....(Ec. 3)}$$

Donde:

h : Altura de la lámina de agua (m).

u : Velocidad media en la dirección x (m/s).

v *:* Velocidad media en la dirección y (m/s).

g *:* Aceleración de la gravedad (m/s^2).

z : Elevación de terreno (m).

t : tiempo (s).

x, y : coordenadas espaciales (m).

$\tau fx, \tau fy$ *:* Términos de fricción en las direcciones x e y (N/m^2).

1.2.7. Métodos numéricos y estructuras de malla en modelación hidráulica

1.2.7.1. Métodos numéricos

1.2.7.1.1. Método de Elementos Finitos (FEM)

Se trata de un método numérico que resuelve ecuaciones diferenciales representando la solución como una suma de funciones base continuas, conocidas como funciones de aproximación, que abarcan todo el dominio del problema. Estas funciones se seleccionan para cumplir con las condiciones de contorno, y los parámetros desconocidos se determinan de manera que satisfagan la ecuación diferencial minimizando los residuos a través de funciones de peso (J. Xaman, 2016).

1.6.2.1.2. Método de Diferencias Finitas (FDM)

Este método se utiliza para obtener soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales, aproximando las derivadas mediante diferencias finitas. Consiste en reemplazar las derivadas en la ecuación diferencial con diferencias finitas, que actúan como aproximaciones. Para lograr esto, se emplean las series de Taylor, permitiendo convertir una ecuación diferencial definida en todo el dominio en una ecuación algebraica en un nodo (Fernández, 2012).

1.6.2.1.3. Método de Volúmenes Finitos (FVM)

El Método de Volúmenes Finitos (Finite Volume Method, FVM) es una técnica numérica ampliamente empleada para resolver ecuaciones diferenciales parciales que representan fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía. Su

principal característica consiste en discretizar el dominio de cálculo en un conjunto de volúmenes de control, sobre los cuales se aplica el principio de conservación, garantizando que el balance de las magnitudes físicas se cumpla tanto de forma local como global (Fernández, 2012).

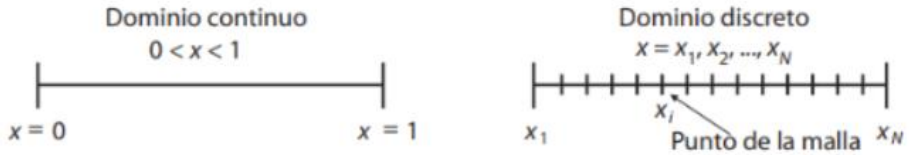
A diferencia del Método de Diferencias Finitas, que aproxima directamente las derivadas en nodos de una malla, el Método de Volúmenes Finitos integra las ecuaciones gobernantes sobre cada volumen de control y evalúa los flujos que atraviesan sus caras. De esta manera, las ecuaciones diferenciales continuas se transforman en un sistema de ecuaciones algebraicas que conserva rigurosamente la masa y la cantidad de movimiento, incluso en geometrías complejas y mallas no estructuradas (Versteeg & Malalasekera, 2007).

1.6.2.2. Discretización Espacial

Esta técnica consiste en dividir el espacio en una serie de puntos finitos. El CFD utiliza esta metodología para transformar un dominio continuo en uno discreto mediante una malla. En un dominio continuo, cada variable de flujo se define en todos los puntos del espacio. Sin embargo, en un dominio discreto, las variables solo se definen en los nodos que componen la malla. Por lo tanto, en una simulación CFD, las variables se calculan exclusivamente en esto nodos, y los valores intermedios se obtienen por interpolación (Fernández, 2012).

Figura 1

Discretización de un dominio



Nota: Fuente (Fernández Oro,2012)

1.6.2.2.1. Mallas estructuradas.

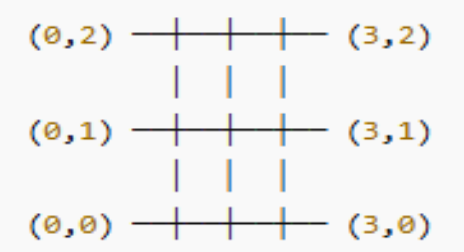
Una malla estructurada es una red de celdas (elementos) dispuestas con un patrón regular y ordenado. Generalmente se componen de celdas cuadradas o rectangulares (en 2D) o cubos/paralelepípedos (en 3D) y las líneas de la malla se cruzan en ángulos rectos.

En una malla estructurada:

- Cada nodo puede identificarse fácilmente por un par de índices *(i,j)* en 2D *(i,j,k)* en 3D.
- La conectividad entre nodos vecinos es uniforme predecible.
- Permite almacenar variables en arreglos (matrices) simples, lo que acelera la implementación y el cálculo numérico.

Por ejemplo, un domino de 2D cuadrado dividido en un numero de celdas de igual tamaño seria generada de la siguiente malla estructurada.

Figura 2
Malla estructurada



Nota: Se muestra una malla 3x3

Una malla estructurada en 2D puede definirse matemáticamente como un conjunto de nodos generados a partir de un sistema de coordenadas cartesianas discretizado:

$x_i = x_{min} + i\Delta x,\ i = 0,1,\ldots.,N_x$ ……..……(Ec. 4)

$y_i = y_{min} + j\Delta y,\ j = 0,1,\ldots.,N_y$ ……..……(Ec. 5)

- N_x y N_y son el número de divisiones x e y respectivamente.
- $\Delta_x = \frac{x_{max} - x_{min}}{N_y}$ y $\Delta_y = \frac{y_{max} - y_{min}}{N_y}$ son los tamaños de celda constantes en cada dirección.

1.2.7.1.2. Mallas no estructuradas:

Una malla no estructurada en 2D se compone de un conjunto de elementos triangulares (o cuadriláteros irregulares), conectados arbitrariamente, sin un patrón regular.

Una malla no estructurada sobre un dominio se define como:

- **Conjunto de nodos (vértices):**

$n\{x_k = (x_k, y_k) \in \Omega | k = 1,2,\ldots,N\}$ ……..……..(Ec. 8)

- **Conjunto de elementos (triángulos):**

$\frac{\partial u}{\partial x} t = \{T_e = (x_i, x_j, x_k) \mid e = 1,2, \dots, E\}$ ……..(Ec. 9)

Donde:

N : Número total de nodos.

E **:** Número total de elementos.

Cada T_e es un triángulo definido por 3 nodos del conjunto N.

Figura 3

Esquema de malla no estructurada



Nota. Fuente (Versteeg & Malalasekera, 2007)

1.2.8. Número de Courant

El número de Courant, también conocido como número CFL en honor a Richard Courant, Kurt Friedrichs y Hans Lewy, quienes publicaron su artículo en 1928, es una condición de convergencia utilizada para resolver ecuaciones diferenciales parciales (Ashgriz & Mostaghimi, 2001). Este número se expresa mediante la siguiente ecuación:

$C = \frac{u}{\Delta x / \Delta t}$ ……..(Ec. 10)

Donde:

- u es la velocidad física y característica del problema.
- Δx, es el tamaño de la malla en la dirección x.
- Δy, es el tamaño de la malla en la dirección y.
- Δt, es el paso del tiempo.
- $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, es la velocidad numérica.

Para conseguir un esquema numérico estable se debe cumplir el rango del número CFL para la estabilidad numérica:

$0 < C = \frac{u}{\Delta x/\Delta t} < 1$ ……..(Ec. 11)

1.2.9. Método del índice de convergencia de malla (GCI)

La selección de un dominio finito en tiempo y espacio introduce errores de discretización en la simulación, lo que hace que una solución numérica sea solo una aproximación a la real. El método GCI cuantifica este error en función del tamaño de la malla, definiéndose como el límite del error relativo entre el resultado computacional y el valor asintótico. Esto especifica el rango de error en el que se sitúa el resultado y la magnitud potencial del error. Además, el GCI revela cuánto mejorará la solución con un mayor refinamiento de la malla, los valores bajos de GCI indican una mayor proximidad a la solución asintótica (Castedo et al., 2019).

El método consiste en comparar la solución exacta con la numérica para calcular el error generado por la discretización, usando la siguiente fórmula:

$E(h) = f_{exacta} - f(h) \approx Ahp$ ……..(Ec.12)

Donde:

- $E(h)$, es el error de discretización.
- f_{exacta}, es la solución exacta.
- $f(h)$, es la solución numérica.
- A, es una constante.
- h, es una medida de la discretización de la malla (tamaño de la malla).
- p, es la tasa u orden de convergencia de la malla.

El método GCI generalmente utiliza tres mallas para su metodología, denominadas (1,2,3). A partir de los valores de las variables obtenidas para cada malla, se puede calcular el orden de convergencia de la malla utilizando la siguiente formula de orden de convergencia de malla.

$p = ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_3}\right)/ln(r)$ ……..(Ec. 13)

Donde r es la razón de refinamiento y se calcula como:

$r = h_3/h_2$ ……..(Ec. 14)

$r = h_2/h_1$ ……..(Ec. 15)

Conociendo el orden de convergencia de la malla, es posible estimar el resultado analítico a través de una solución asintótica para h cuando tiende a cero, utilizando las mallas más finas disponibles. Para ello, se emplea la Ecuación de solución asintótica, que representa la extrapolación de Richardson, la cual consiste en obtener una estimación de orden superior del valor en que el espacio de la malla es cero a partir de valores discretos de orden inferior.

$f_{h\to 0} \approx f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^2 - 1}$ ……..……..……..(Ec. 16)

Finalmente se sugiere el cálculo del índice de convergencia de la malla GCI de la forma:

$GCI_{AB} = \frac{F_S|\varepsilon|}{r^p - 1}$ ……..……..……..(Ec. 17)

Donde:

- GCI_{AB}, es el índice de convergencia de las dos mallas analizadas.
- F_S , es un factor de seguridad igual a 1.25 para tres mallas y tiene un valor de 3 cuando se utilizan dos mallas.
- $|\varepsilon|$, es el error relativo entre la malla más fina y la mas robusta.

Se verifica que las soluciones se encuentran dentro del rango de convergencia asintótica través de los valores de GCI calculados para las tres mallas. La evaluación de la precisión del código y de los cálculos requiere que la malla esté suficientemente refinada para asegurar que la solución se sitúe en dicho rango asintótico. Esta verificación se realiza mediante la aplicación de la Ecuación de convergencia de malla mediante los GCI.

$GCI_{23} = r^p GCI_{12}$ ……..……..……..(Ec. 18)

$\frac{GCI_{23}}{r^p GCI_{12}} \approx 1.0$ ……..……..……..(Ec. 19)

En estudios de sensibilidad numérica, la selección de una resolución del MDT o de un tamaño de malla no debe basarse únicamente en un indicador de convergencia, sino en la evaluación conjunta de la consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

1.2.10. Costos incrementales de convergencia de malla.

Según Roache (1998) los costos incrementales de convergencia de malla representan el aumento progresivo del costo computacional requerido para obtener mejoras cada

vez menores en la precisión numérica mediante el refinamiento de la malla. Conforme la solución se aproxima a la región asintótica de convergencia, el tiempo de procesamiento y el número de elementos aumentan significativamente, mientras que la reducción del error de discretización se vuelve cada vez más pequeña, permitiendo identificar una resolución de malla óptima basada en la relación precisión–costo computacional.

Para el cálculo de esta variación nos da la fórmula de costo:

$Cost(n) = \frac{Cost(1)}{r^{D(n-1)}}$ ……..……..…….....(Ec. 20)

Donde:

- *n* es el tamaño de malla
- *r* es la relación o razón efectiva.
- *D* representa a la dimensión.
- *Cost(1)* representa la unidad en la malla más fina.

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

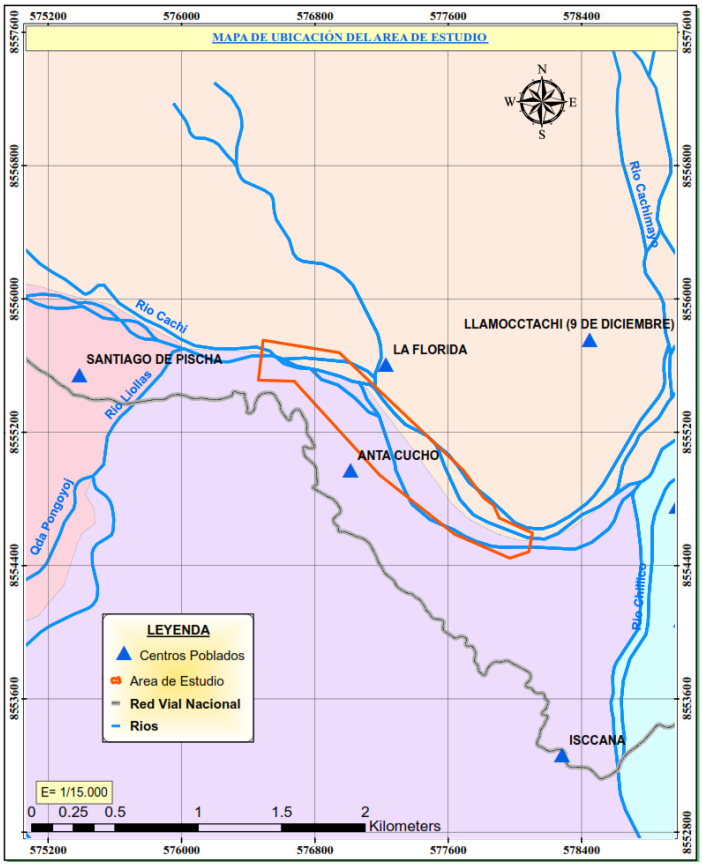
2.1.1. Zona de estudio

El valle de Antacucho, se encuentra ubicado en la parte noroeste de la provincia de Huamanga a 26.4 km de la ciudad de Ayacucho, vía PE-26B Ayacucho – San José de Ticllas a 2435 m.s.n.m.

El tramo de estudio corresponde a un sector del rio ubicado en el valle de Antacucho con una longitud aproximada de 2.08 km, su plano planta-perfil, lo que permite representar adecuadamente el comportamiento hidráulico del cauce y de la planicie de inundación para los fines de la presente investigación.

Figura 4

Vista principal de la zona de estudio



La selección de este tramo se realizó considerando criterios hidrológicos y geomorfológicos, debido a que presenta un cauce representativo, una planicie de

inundación bien definida y antecedentes de desbordamientos durante eventos de lluvias intensas. Asimismo, el tramo comprende áreas agrícolas e infraestructura susceptible de afectación por inundaciones, lo que lo convierte en un sector representativo para evaluar el comportamiento hidráulico del flujo y la influencia de la resolución del modelo digital del terreno en las simulaciones realizadas con HEC-RAS e IBER.

2.1.2. Ubicación política

Región : Ayacucho

Provincia : Huamanga

Distrito : San José de Ticllas

Localidad: : Valle de Antacucho

2.1.3. Ubicación geográfica

Sur : 8554968.233 m S

Este : 577259.552 m E

Altitud : 2435.607 msnm

2.1.4. Limites

Tabla 2

Límite del distrito de San José de Ticllas

Dirección	Limite	Dirección	Limite
Norte	Santiago de Pischa	Este	Socos
Sur	Vinchos, Socos	Oeste	Santiago de Pisha, Vinchos

Nota. Límites políticos del distrito de San José de Ticllas, adaptado.

Figura 5

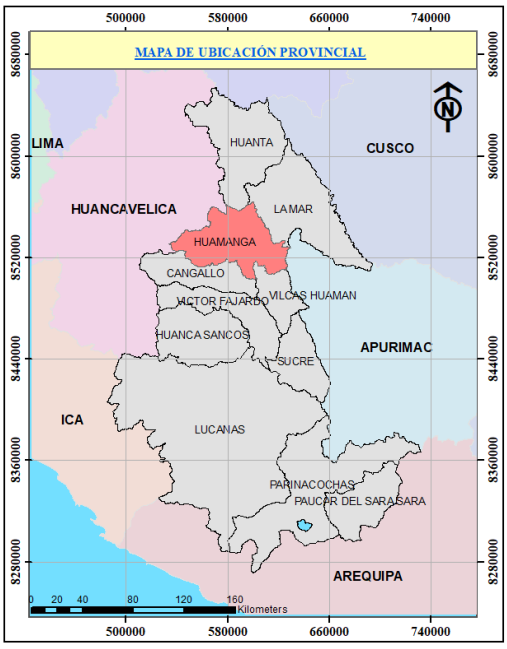
Mapa departamental del proyecto



Nota. Este mapa ha sido elaborado para ilustrar la ubicación departamental del proyecto en el territorio nacional.

Figura 6

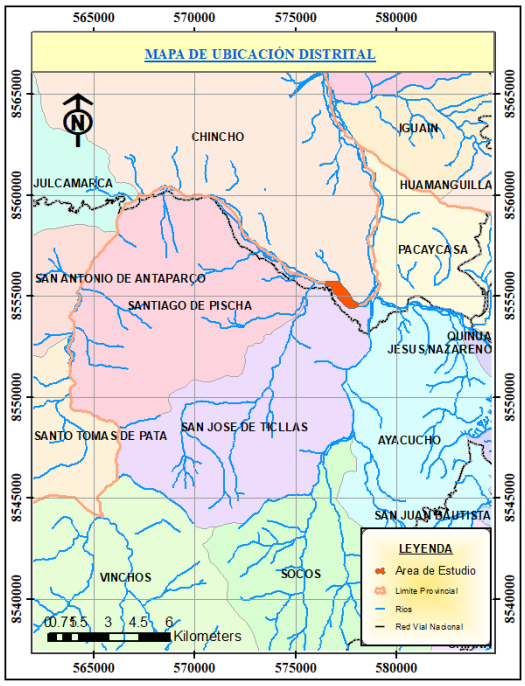
Mapa provincial del proyecto



Nota. Este mapa ha sido elaborado para representar la distribución provincial del proyecto, señalando las principales áreas de intervención del proyecto en la provincia de Huamanga.

Figura 7

Mapa distrital del proyecto



Nota. El mapa ha sido elaborado para representar la distribución provincia de Huamanga, área de intervención de la tesis ubicada en el distrito de San José de Ticllas, Valle Antacucho.

Figura 8

Zona de intervención de la tesis



Nota. Esta muestra la zona de trabajo y la variación topográfica del valle Antacucho.

2.1.5. Accesibilidad

Tabla 3
Vías de acceso para llegar hacia la zona de estudio

Ruta	Distancia	Tiempo	Estado
Huamanga – Repartición Compañía	17 km	0.38 hr	Asfaltado
Repartición compañía – valle Antacucho	9.3 km	0.22 hr	Asfaltado básico
Total	**125 km**	**1 hr**	

Nota. Esta tabla muestra la distancia, tiempo estimado de viaje y el estado del pavimento de la ruta entre Huamanga y el valle de Antacucho. Los datos son aproximados. Fuente: MTC

2.1.6. Clima de la zona de estudio

En el valle de Antacucho se presentan precipitaciones pluviales promedio varían de 500 mm a 600 mm anuales y la temperatura varía de los 12 °C a 28 °C en la zona alta y el rio Cachi respectivamente, las zonas de vida en la zona de estudio se presentan como:

Monte espinoso Subtropical (mte- S), es una zona de vida de clima cálido y seco, con presencia de escasas lluvias y vegetación dominada por arbustos espinosos, esta es una característica neta del valle de Antacucho.

Las vegetaciones predominantes son:

- Huarango
- Molle
- Retama
- Tuna
- Cabuya

2.1.7. Topografía de la zona de estudio:

El valle de Antacucho es representativo de valles interandinos o planicies de inundación el cual tiene una topografía llana, la altitud varía desde 2420.65 msnm al 2492.34 msnm, con áreas de cultivo al borde del cauce del río Cachi.

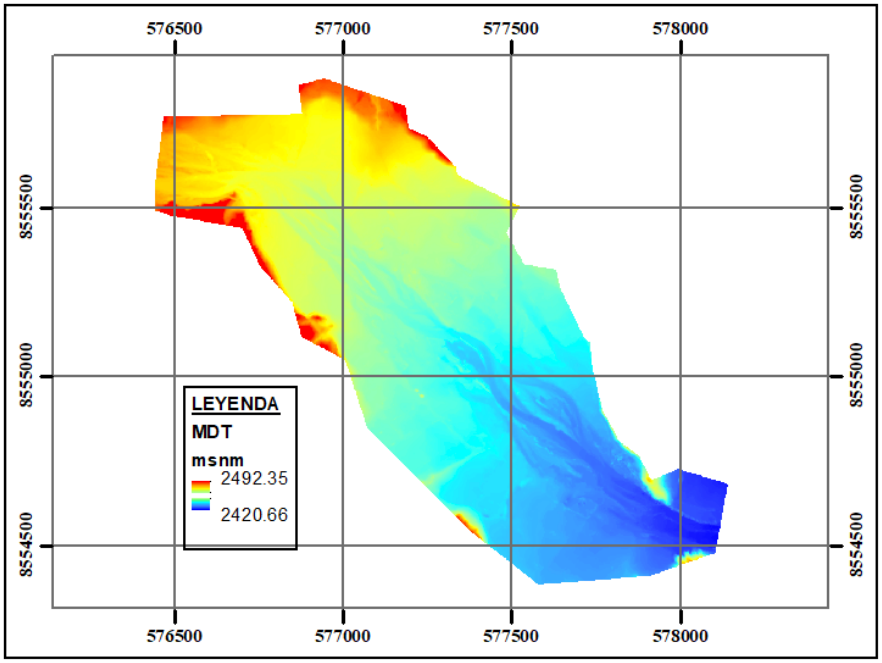
Figura 9

Topografía de la zona de estudio vista aérea.



Figura 10

Modelo Digital de Terreno (MDT)



Nota. Se muestra la variación topográfica de la zona de proyecto

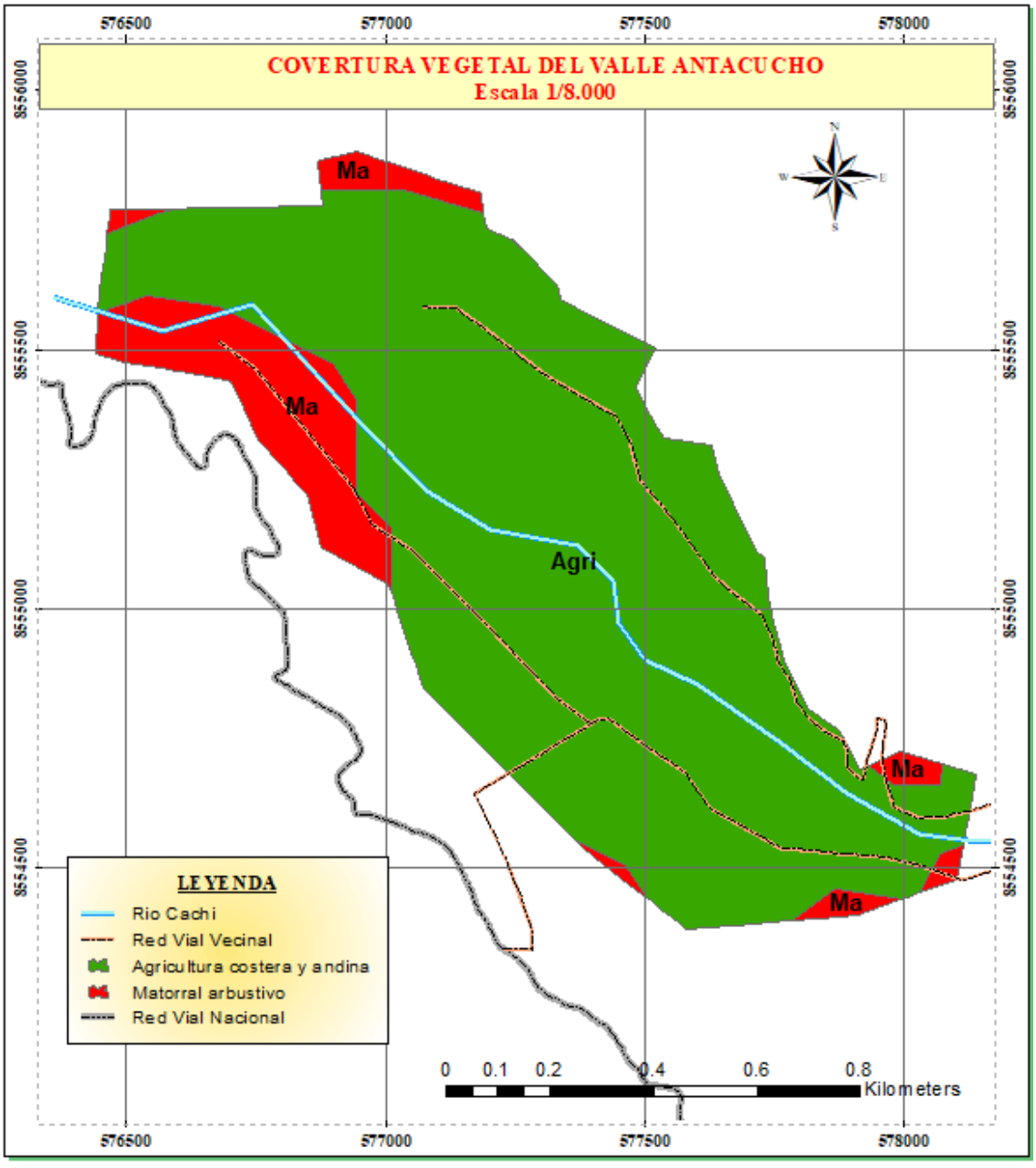
2.1.8. Uso de suelo

En el valle de Antacucho el uso del suelo es dedicado a la agricultura, se tiene cultivos como el alfalfa, maíz, lechuga y brócoli estas son comercializado en el mercado local de la ciudad de huamanga, según el mapa de cobertura vegetal la zona de estudio

cuenta con 0.95 km^2 de agricultura costera y andina (Agri) y 0.14 km^2 de matorral arbustivo (Ma) como se puede observar en el siguiente mapa:

Figura 11

Cobertura vegetal de la zona de estudio



Nota. Se muestra el uso de suelo representativo de la zona de proyecto

2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

2.2.1. Materiales y equipos en campo

- Flexómetro
- Libreta de campo

- Casco
- Chaleco
- GPS Diferencial SOUTH Galaxy G3
- Aeronave no tripulada AUTEL EVO II PRO RTK
- Cámara fotográfica

2.2.2. Materiales y equipos en oficina

- Laptop Intel Core i5 16GB de RAM
- Computadora Intel Core i7 16GB de RAM
- Impresora multifunción
- Papel bond A4 y A3
- Lapiceros

2.2.3. Programa de ingeniería

- Microsoft Office
- AutoCAD Civil 3D 2023
- ArcGIS 10.8.0
- Google Earth
- QGIS 3.44.9
- HEC-RAS 6.7 Beta 4a
- IBER 3.3.1
- Agisoft Metashape Professional 2.0.0

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. Método de investigación

Método de investigación es el procedimiento metódico y estructurado para abordar un reto o tema de investigación el tema, la determinación del tema de investigación, la recopilación y el análisis de datos, y la presentación de conclusiones y sugerencias son componentes de una metodología de investigación (Medina et al., 2023).

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, orientado al análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones mediante mallas estructuradas y no estructuradas en el valle de Antacucho. Para ello, se analizarán datos numéricos obtenidos del modelamiento hidráulico en distintos escenarios, con la finalidad de medir las variables de influencia.

2.3.2. Tipo de investigación

La investigación aplicada se orienta a la solución de problemas específicos mediante la utilización del conocimiento científico (Torres, 2010)

El proyecto es de tipo aplicada, ya que busca resolver un problema práctico relacionado con la influencia de la resolución del MDT y del tamaño de malla sobre el comportamiento hidráulico y la eficiencia computacional de modelos bidimensionales. Se enmarca en un enfoque cuantitativo, al analizar datos numéricos obtenidos de simulaciones computacionales. Además, es comparativo y explicativo, porque contrasta los resultados obtenidos mediante los modelos hidráulicos HEC-RAS 2D e IBER y explica el efecto de la resolución del terreno en la simulación hidráulica. Su diseño es no experimental, ya que no se manipulan variables directamente, sino que se observan los resultados generados por modelos digitales bajo distintos escenarios.

2.3.3. Nivel de investigación

Explicativa: porque busca identificar y explicar cómo la variación en la resolución del modelo digital de terreno (MDT) influye en los resultados de las simulaciones hidráulicas.

2.3.4. Diseño de investigación

No experimental-comparativo: El diseño de la investigación es no experimental y comparativo, debido a que las variables de estudio no serán manipuladas de manera directa, sino analizadas en su contexto natural mediante el modelamiento hidráulico. Asimismo, es comparativo porque se evaluarán y contrastarán los resultados obtenidos con diferentes resoluciones de MDT y tipos de mallas estructuradas y no estructuradas en la simulación de inundaciones del valle de Antacucho.

2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

2.4.1. Técnicas

Para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas de observación técnica, revisión de estudios hidrológicos, datos topográficos y antecedentes relacionados con modelamiento hidráulico e inundaciones, procesamiento geoespacial y simulación hidráulica computacional.

La observación permitió identificar las características físicas e hidráulicas del área de estudio y comparar las mallas estructuradas y no estructuradas en una simulación hidráulica computacional.

2.4.2. Instrumentos

Como instrumentos se utilizaron fichas bibliográficas, modelos digitales del terreno (MDT), ortofoto e imágenes satelitales, asimismo se emplearon software especializado como ArcGIS, QGIS, HEC-RAS, IBER para el procesamiento geoespacial y simulación hidráulica mediante mallas estructuradas y no estructuradas, permitiendo comparar los resultados obtenidos según el tipo de malla y con una resolución alta del MDT.

2.5. LA POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO DE PROYECTO

2.5.1. Población

En esta investigación, la población se entiende como el conjunto de elementos o unidades de estudio que comparten características específicas y sobre los cuales se pretende generalizar los resultados(Hernández et al., 2014).

La población de estudio estuvo constituida por todas las resoluciones de Modelos Digitales de Terreno (MDT) y configuraciones de mallas numéricas aplicables a la simulación de inundaciones bidimensionales en el valle Antacucho – Ayacucho mediante modelos hidráulicos bidimensionales implementados en HEC-RAS 2D e IBER.

2.5.2. Muestra

La muestra es un subconjunto de la población del cual se recolectan los datos y debe ser representativo de dicha población para obtener resultados válidos dentro de una investigación (Hernández et al., 2014).

La muestra estuvo conformada por las resoluciones de MDT (1m, 2m, 3m, 4m y 5 m) y tamaños de malla (1x1, 2x2, 3x3, 4x4 y 5x5) seleccionados para la ejecución de las simulaciones hidráulicas, considerando aquellas que presentan mayor aplicabilidad y disponibilidad para el análisis comparativo de inundaciones dentro del área de estudio.

2.6. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

2.6.1. MDT (Modelo digital del terreno)

Para el presente proyecto se realizó el trabajo de levantamiento topográfico con fotogrametría aérea apoyados con GPS diferencial estático (DGPS/RTK), lo cual fue procesado y corregido con el uso del software Agisoft Metashape en el área de estudio es de 1.1 km^2.

2.6.1.1. Planificación del levantamiento aerofotogramétrico

Se hizo una primera visita a la zona de trabajo, esto se realizó el día anterior al levantamiento topográfico y fue con la finalidad de buscar el mejor lugar para poder

iniciar los vuelos; además, de ubicar los lugares donde se colocarán los puntos de control, se hizo un reconocimiento general del área de trabajo para detectar interferencias (postes, arboles, antenas, etc) con el fin de realizar el vuelo lo más seguro posible.

Figura 12
Planificación del vuelo en el valle de Antacucho



Nota. Se muestra la variación topográfica de la zona de proyecto

2.6.1.2. Trabajo de campo en el levantamiento Aero fotogramétrico

Antes de realizar el vuelo se incorporó información en la programación de vuelo, estos datos se describen a continuación.

- Altura de vuelo se considera en base a la topografía del terreno, presencia de árboles, antenas, postes, etc. Por lo tanto, se tomó una altura de vuelo de 80 metros, para la seguridad del equipo y obtener imágenes de mayor precisión.
- Intersección lateral y frontal de fotografías se decidió una intersección entre imágenes mayor al 50% tanto lateral como frontal, esto se tomó en cuenta debido a que la topografía de la zona es llana y tendrá un mejor enfocado el área del terreno que se capture en los distintos lados.
- Con ayuda de la aplicación “AUTEL EXPLORER EVO II V3” se realizó la ruta de vuelo, en esta aplicación se incorporó la información de altura de vuelo, intersección lateral y frontal, con ellos la aplicación calculará automáticamente la cantidad de fotografías, intervalo de tiempo entre fotografías y la resolución de

la imagen, en la siguiente imagen se muestra la programación de vuelo para la zona del proyecto.

Figura 13
Vista aérea del valle Antacucho.



*Nota. S*e muestra las características y el área de inundación el valle Antacucho.

2.6.1.3. Puntos de control

Los puntos de control son necesarios para poder georreferenciar correctamente las fotografías y el resultado final, el procedimiento de la recolección de los puntos de control, estos se marcaron con yeso para ser visualizados en las fotografías capturadas por el dron y ser medidas, teniendo así sus coordenadas correctas, en la siguiente figura se muestra los puntos de control.

Figura 14
Puntos de control dejados en el terreno



*Nota. S*e muestra los puntos de control dejados aproximadamente 2x2 metros en forma de cruz para su visualización y toma de datos en el punto de intersección.

Tabla 4
Puntos de control tomadas en campo

Descripción	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)
PC1	577960.244	8554512.785	2423.908
PC2	577754.825	8554674.409	2427.173
PC3	577137.203	8555151.372	2438.01
PC4	577966.726	8554582.308	2422.807
PC5	577697.536	8554772.221	2426.566
PC6	576854.305	8555440.533	2442.112
PC7	576816.205	8555515.402	2444.262
PC8	576986.234	8555353.519	2441.274
PC9	577154.617	8555240.731	2438.747
PC10	577376.2	8555124.602	2436.226
PC11	577430.889	8555083.708	2433.276
PC12	577459.265	8555014.665	2432.893

Nota. Todos los puntos de control están referenciados en coordenadas WGS-84 UTM18s

2.6.1.4. Procesamiento del MDT en Agisoft Metashape

Agisoft Metashape es un software de fotogrametría digital desarrollado por Agisoft, utilizado para el procesamiento de imágenes y generación de modelos tridimensionales, ortomosaico y modelos digitales del terreno (MDT). El programa permite transformar fotografías obtenidas mediante drones, cámaras terrestres o sensores en información espacial de alta precisión aplicada en topografía, ingeniería, GIS y estudios hidráulicos (Agisoft LLC., 2024).

Para el procesamiento se procede a la importación de fotografías y orientación de fotos para reducir errores de ubicación y llegar a coincidir ambos levantamientos topográficos, se procedió a la colocación de los puntos de control que fueron captados mediante una marca con yeso, estas fueron colocadas sobre puntos anteriormente medidos, para ello se procede a la colocación de marcadores (puntos de control) en cada una de las fotografías en la que aparecen y posterior a ello se continua con los parámetros de procesamiento.

Tabla 5
Parámetros de Procesamiento

Parámetros de procesamiento	Tamaño de archivo	Tiempo de procesamiento
Puntos de paso	2.76 GB	7 minutos 42 segundos
Mapas de profundidad	1.65 GB	20 minutos 59 segundos
Nube de puntos	5.34 GB	32 minutos 12 segundos
Malla	2.24 GB	03 minutos 38 segundos
MDE	388.26 MB	1 minuto 3 segundos
Ortomosaico	17.88 GB	18 minutos 29 segundos

Nota. Se muestra los procesos de procesamiento y pasos a seguir durante el procesamiento de creación del modelo digital de elevación y ortomosaico.

2.6.1.5. Exportación de resultados

Una vez realizado los procesos anteriores se procede a exportar los resultados, en este caso se realizará la exportación en formato TIF, del resultado de proceso se tiene un modelo digital de terreno con una resolución de 0.49 m.

El programa Agisoft Metashape tiene la función de exportar el MDT en las resoluciones que se requiere en el presente proyecto, los cuales son 1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

Tabla 6
Modelo digital de terreno (MDT)

MDT (m)	Tamaño de archivo
1x1	4.10 MB
2x2	1.07 MB
3X3	507 KB
4X4	277 KB
5X5	183 KB

Nota. Se muestra las resoluciones de MDT y el tamaño de archivo en para cada una.

2.6.2. Datos hidrológicos de caudal máximo

Para el caudal máximo, se tomó como referencia una tesis desarrollada en la zona de estudio, en la cual se determinaron los gastos máximos asociados a períodos de retorno de 50, 100 y 200 años para el río Cachi.

Figura 15
Caudal máximo por TR para la cuenca Cachi.

Descripción	Área A (Km²)	Qmax (m³/s) Tr=50 años	Qmax (m³/s) Tr=100 años	Qmax años (m³/s) Tr=200 años
SUBCUENCA A	356.57	122.70	150.90	181.20
SUBCUENCA B	394.94	208.10	232.20	254.70
SUBCUENCA C	261.84	106.70	133.50	162.50
SUBCUENCA D	243.32	73.00	92.70	114.00
SUBCUENCA E	242.28	141.50	159.30	176.00
SUBCUENCA F	146.22	33.60	40.50	47.50
UNION-1	1013.35	410.90	482.10	554.30
UNION-2	1498.95	600.50	712.00	825.60
PUNTO DE AFORO	**1645.17**	**631.80**	**749.00**	**868.30**

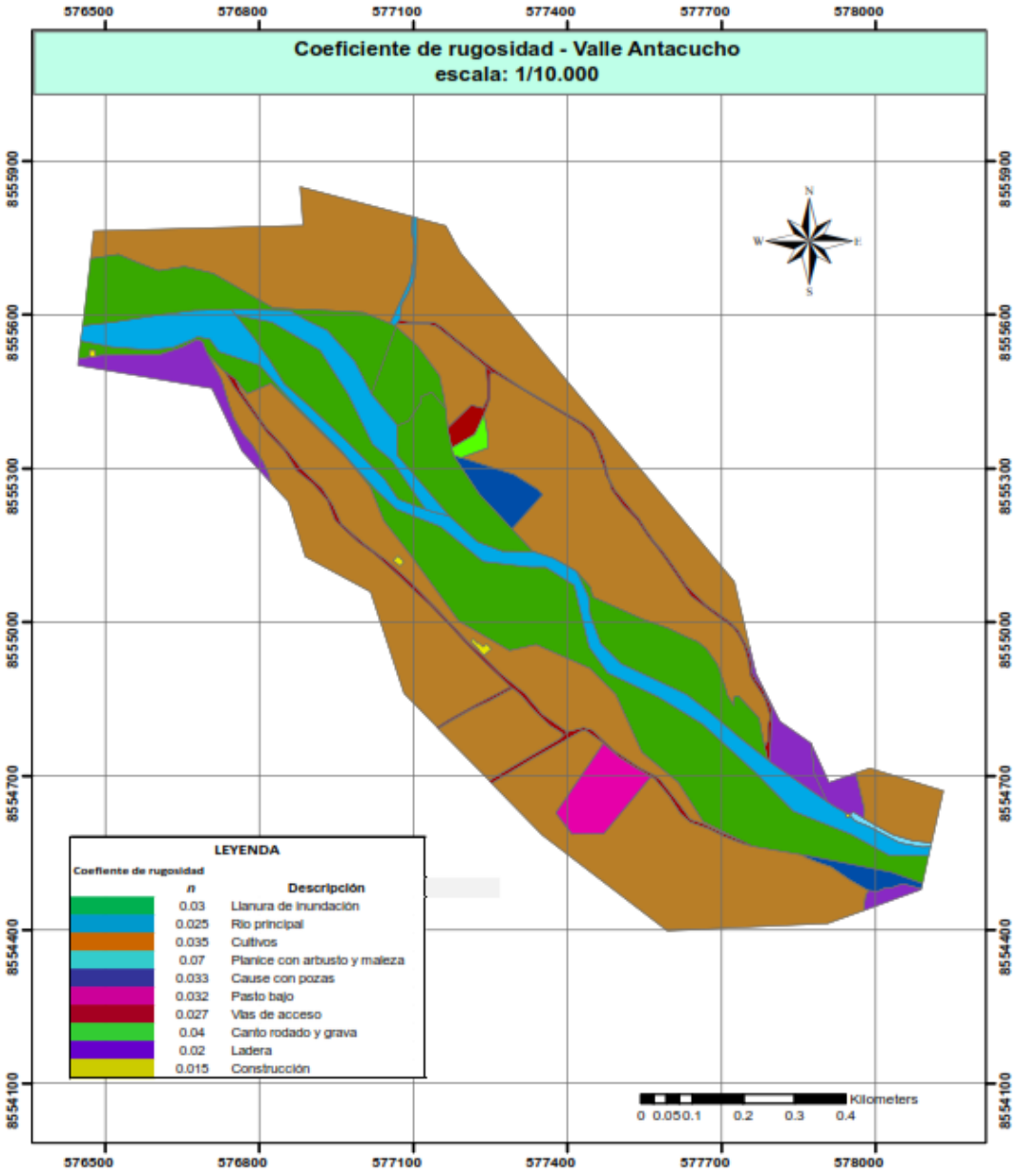
Nota. (Fernández, 2016)

Para el presente estudio, se considerará un caudal correspondiente a un período de retorno de 100 años, equivalente a 749 m^3/s.

2.6.3. Rugosidad en el rio Cachi.

Para la elaboración del mapa de rugosidad del área de estudio, se identificaron los diferentes usos de suelo presentes en las márgenes izquierda y derecha del cauce, así como las zonas de explotación de agregados existentes en el sector. Esta identificación permitió definir de manera más precisa los coeficientes de rugosidad, utilizando como apoyo el ortomosaico obtenido a partir del levantamiento topográfico realizado en la zona.

Figura 16
Valores de coeficiente de rugosidad (n)



Nota. Se muestra los valores de coeficientes de rugosidad según el valor designado en el área de estudio.

2.6.4. Modelamiento Hidráulico en HEC-RAS

2.6.4.1. Plan de simulaciones a realizarse

En el presente estudio se plantearon 25 simulaciones hidráulicas con el objetivo de analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) sobre el comportamiento de las mallas estructuradas. Para ello, se consideraron cinco resoluciones diferentes del MDT y tamaños de malla que varían desde 1×1 m hasta 5×5 m.

Mediante estas simulaciones, se evaluará cómo la variación en la resolución del terreno influye en la precisión de los resultados hidráulicos, la representación de las zonas inundables, la estabilidad numérica y los tiempos de procesamiento del modelo. De esta manera, se busca identificar la combinación más adecuada entre resolución del MDT y tamaño de malla, permitiendo obtener simulaciones más confiables y eficientes para el análisis hidráulico e inundaciones.

Tabla 7

Plan de simulaciones con mallas estructuradas

Resolución de MDT (m)	caudal (m^3/s)	Código	Malla	Resultados esperados
1	749	HR1-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR1-M2x2	2x2	
		HR1-M3x3	3x3	
		HR1-M4x4	4x4	
		HR1-M5x5	5x5	
2	749	HR2-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR2-M2x2	2x2	
		HR2-M3x3	3x3	
		HR2-M4x4	4x4	
		HR2-M5x5	5x5	
3	749	HR3-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR3-M2x2	2x2	
		HR3-M3x3	3x3	
		HR3-M4x4	4x4	
		HR3-M5x5	5x5	
4	749	HR4-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR4-M2x2	2x2	
		HR4-M3x3	3x3	
		HR4-M4x4	4x4	
		HR4-M5x5	5x5	
5	749	HR5-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR5-M2x2	2x2	
		HR5-M3x3	3x3	
		HR5-M4x4	4x4	
		HR5-M5x5	5x5	

Nota. Se muestra las 25 simulaciones en el software HEC-RAS.

2.6.4.2. Diagrama de metodología

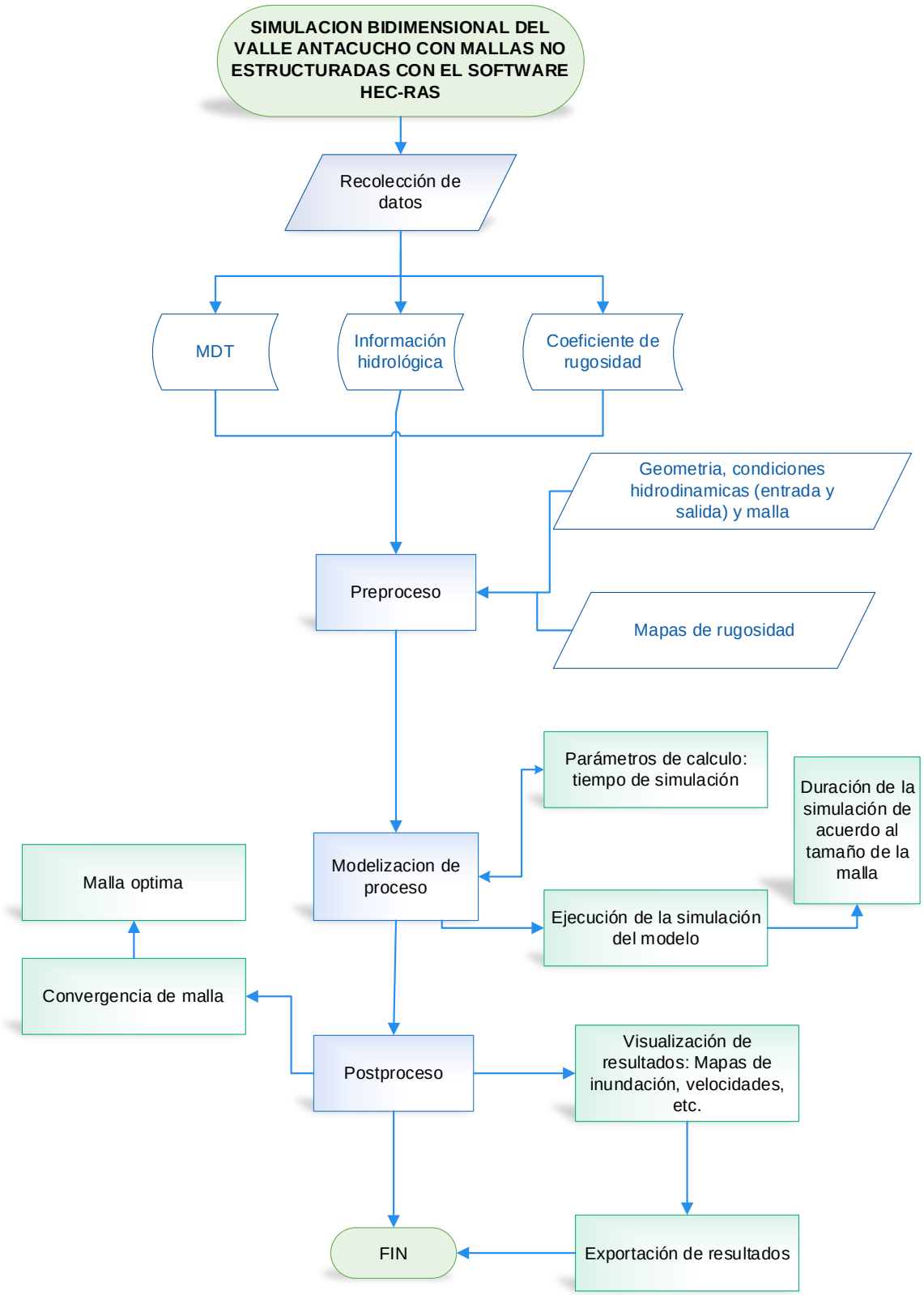
Para efectuar las simulaciones en HEC-RAS, es necesario considerar tres etapas principales dentro del proceso de modelación.

- **Preproceso:** En esta etapa se importa la geometría correspondiente al área de estudio y se importa la topografía, las rugosidades de Manning, condiciones de contorno de ingreso y salida, se crea las mallas estructuradas según el plan de simulaciones.
- **Modelización de Proceso:** Se ejecuta el cálculo de la simulación del modelo y genera un archivo de exportación para ArcView.
- **Postproceso:** Genera los resultados finales, áreas de inundación para cada simulación.

Para un mejor entendimiento se elaboró un flujograma de la simulación.

Figura 17

Diagrama de metodología para mallas estructuradas



Nota. Se muestra el diagrama o pasos a seguir para la simulación en software HEC-RAS.

2.6.4.3. Preproceso

Para el modelamiento bidimensional con mallas estructuradas en HEC-RAS se inicia con la recopilación de información básica necesaria, como el modelo digital de terreno (MDT), caudal de diseño, coeficiente de rugosidad de Manning, y delimitación del área de estudio.

Posteriormente se importa el terreno, con el interfaz RAS Mapper se crea un nuevo archivo Terrain desde un archivo .tif, con este paso se genera la topografía del terreno en archivo. hdf, una vez creado se verifica visualmente que no haya errores en la zona de interés.

Posteriormente, se generó la malla estructurada sobre la geometría exportada del área de estudio. Para el presente proyecto, se consideraron tamaños de malla de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m y 5 m, con la finalidad de evaluar la influencia de la resolución de la malla.

Para el presente proyecto se realizó cinco tipos de mallas, con el cual se simulo el caudal de 749 m3/s, en la tabla 9 se muestra el tamaño de malla no estructurado y número de elementos generados.

Tabla 8

Tamaño de malla y número de elementos de mallas estructuradas

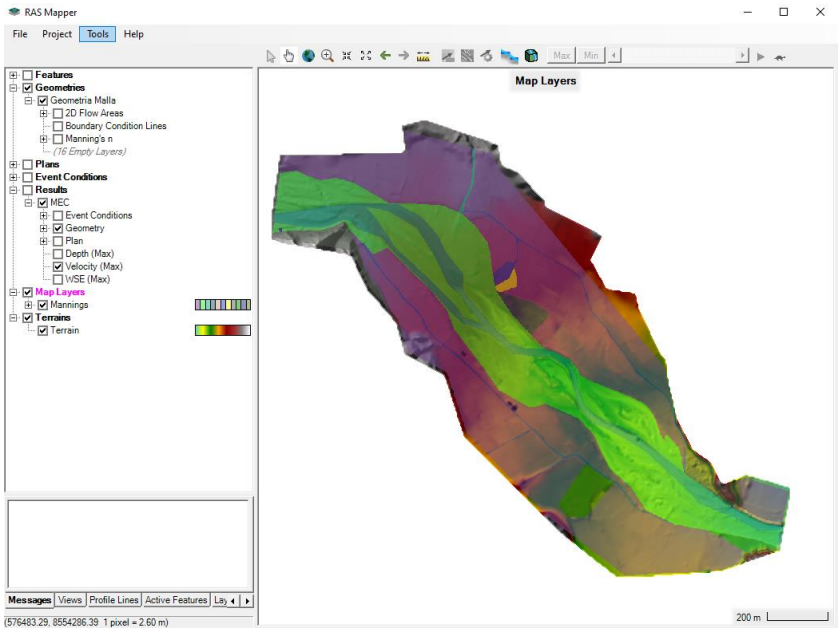
Tamaño de malla	Número de elementos
1x1	590,739
2x2	147,414
3x3	65,383
4x4	36,711
5x5	23,454

Para asignar el mapa de rugosidad en HEC-RAS se utiliza para asignar los coeficientes de Manning *(n)* según el tipo de cobertura del terreno, permitiendo representar de manera más realista la resistencia al flujo.

- **Paso 1:** Crear un archivo en formato Shapefile (.shp) con los identificadores asociados a los diferentes valores de rugosidad.

- **Paso 2:** Asignar automáticamente sobre la malla con la herramienta “New Land Cover”.

Figura 18
Usos de suelo asignado en HEC-RAS



Como siguiente paso se introduce el caudal de diseño en las condiciones de contorno de entrada y salida en la entrada se coloca un hidrograma con un caudal de 749 m^3/s distribuidos en 30 minutos cada 5 minutos para obtener un resultado más realista, de la misma forma se coloca el pendiente de terreno el cual se obtuvo del plano planta perfil lo cual es de 0.014 m/m. en las condiciones de salida solo se considera una profundidad normal ya que se trata de un rio natural con una pendiente de 0.014 m/m. con ello se continua con el proceso o simulación.

2.6.4.4. Proceso

Una vez culminada la etapa de preproceso, se procede con la ejecución del modelo y la resolución de las ecuaciones hidráulicas, etapa conocida como fase de procesamiento. Para desarrollar esta fase, es necesario considerar las capacidades del hardware del equipo utilizado en la simulación, así como los esquemas numéricos empleados para la resolución de las ecuaciones y los parámetros definidos para el correcto funcionamiento del modelo.

2.6.4.4.1. Hardware empleado.

Para la simulación se utilizó una computadora cuyas características de hardware son:

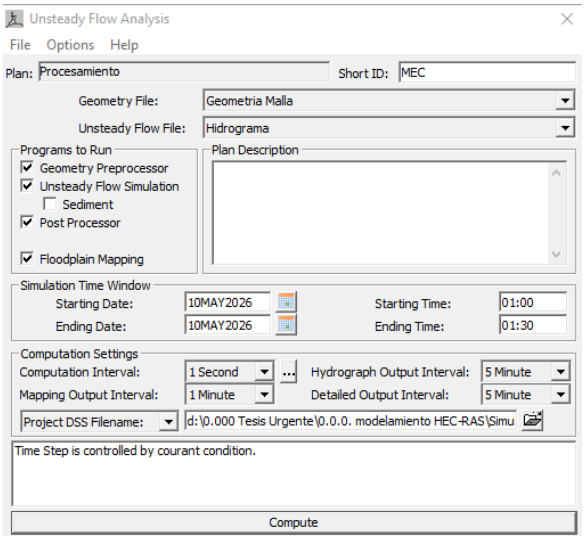
Tabla 9
Características de la computadora

Características de la computadora de simulación	
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz, 2.90 GHz
Núcleos	8
Procesadores lógicos	16
RAM instalada	16 GB
RAM Utilizable	15.9 GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650 (4 GB)

2.6.4.4.2. Análisis de flujo no permanente.

El análisis de flujo no permanente (Unsteady Flow Analysis) en HEC-RAS permite representar el comportamiento hidráulico de un cauce cuando variables como el caudal, la velocidad y el nivel del agua varían en función del tiempo y del espacio. Este tipo de análisis es ampliamente utilizado para la simulación de inundaciones, avenidas máximas y propagación de ondas de crecida, debido a que reproduce de manera más realista las condiciones hidráulicas naturales. Para ello, el programa resuelve las ecuaciones de Saint-Venant, basadas en los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento(U.S. Army Corps of Engineers, 2025).

Figura 19
Interfaz de análisis de flujo no permanente



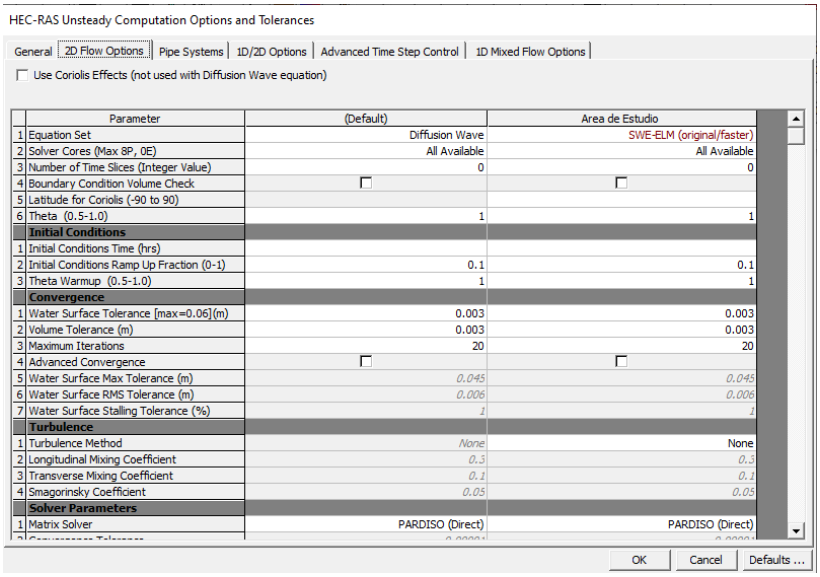
2.6.4.4.3. Opciones y tolerancia de cálculo en HEC-RAS

La opción SWE-ELM (original/faster) en HEC-RAS corresponde al solucionador numérico empleado para resolver las ecuaciones de aguas someras (Shallow Water

Equations). Este solucionador permite simular el comportamiento bidimensional del flujo, considerando las variaciones de profundidad y velocidad del agua tanto en el espacio como en el tiempo, lo que facilita una representación más precisa del comportamiento hidráulico en zonas inundables y cauces naturales.

Figura 20

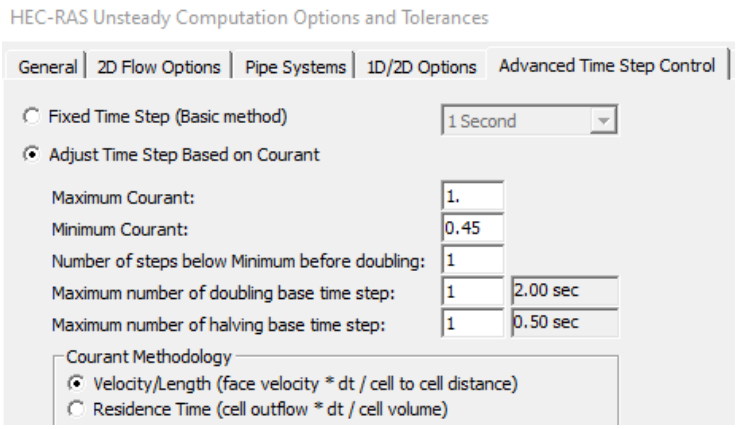
Ecuación de cómputo en HEC-RAS



En el presente proyecto, se ajustó el paso de tiempo durante la simulación con el objetivo de mantener la estabilidad numérica, evitar errores y reducir los tiempos de cálculo. Para ello, se estableció un valor máximo de Courant igual a 1 y un valor mínimo de Courant de 0.45, de manera similar a la configuración empleada en IBER.

Figura 21

Ajuste de número de Courant en HEC-RAS

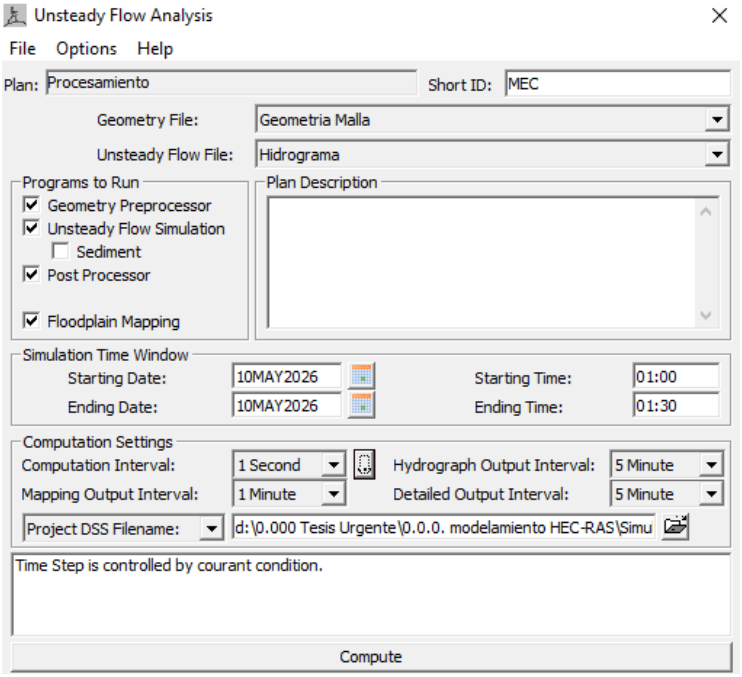


El tiempo de simulación considerado para el presente proyecto fue de 30 minutos; para ello, se configuró un periodo comprendido entre las 01:00 y las 01:30 horas. Asimismo,

se estableció un intervalo de cálculo de 1 segundo para el proceso de simulación hidráulica.

Figura 22

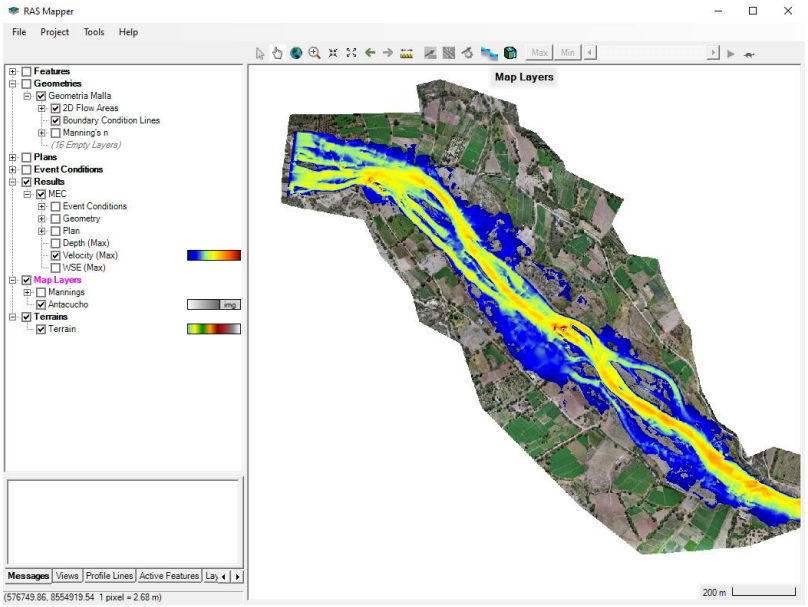
Herramienta de "Unsteady Flow Analysis"



2.6.4.5. Post-proceso

Después de ejecutar el cálculo de la simulación, los resultados fueron visualizados en RAS Mapper de HEC-RAS. En esta herramienta es posible observar diferentes parámetros hidráulicos, tales como el calado expresado en metros (m), la velocidad del flujo en metros por segundo (m/s) y la cota de la superficie del agua en metros (m). Asimismo, los resultados pueden representarse mediante mapas de colores, facilitando la interpretación y análisis del comportamiento hidráulico en el área de estudio.

Figura 23
Visualización de resultados en HEC-RAS



Nota. Se muestra las zonas inundadas de color azul y amarillo.

2.6.5. Modelamiento hidráulico bidimensional en IBER.

2.6.5.1. Plan de simulaciones a realizarse

En el presente estudio se plantearon 25 simulaciones hidráulicas con el objetivo de analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) sobre el comportamiento de las mallas no estructuradas. Para ello, se consideraron cinco resoluciones diferentes del MDT y tamaños de malla que varían desde 1×1 m hasta 5×5 m.

Mediante estas simulaciones, se evaluará cómo la variación en la resolución del terreno influye en la precisión de los resultados hidráulicos, la representación de las zonas inundables, la estabilidad numérica y los tiempos de procesamiento del modelo. De esta manera, se busca identificar la combinación más adecuada entre resolución del MDT y tamaño de malla, permitiendo obtener simulaciones más confiables y eficientes para el análisis hidráulico e inundaciones.

Tabla 10
Plan de simulaciones con mallas no estructuradas

Resolución de MDT (m)	caudal (m^3/s)	Código	Malla	Resultados esperados
1	749	IR1-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR1-M2x2	2x2	
		IR1-M3x3	3x3	
		IR1-M4x4	4x4	
		IR1-M5x5	5x5	
2	749	IR2-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR2-M2x2	2x2	
		IR2-M3x3	3x3	
		IR2-M4x4	4x4	
		IR2-M5x5	5x5	
3	749	IR3-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR3-M2x2	2x2	
		IR3-M3x3	3x3	
		IR3-M4x4	4x4	
		IR3-M5x5	5x5	
4	749	IR4-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR4-M2x2	2x2	
		IR4-M3x3	3x3	
		IR4-M4x4	4x4	
		IR4-M5x5	5x5	
5	749	IR5-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR5-M2x2	2x2	
		IR5-M3x3	3x3	
		IR5-M4x4	4x4	
		IR5-M5x5	5x5	

Nota. Se muestra las 25 simulaciones en el software IBER.

2.6.5.2. Diagrama de metodología

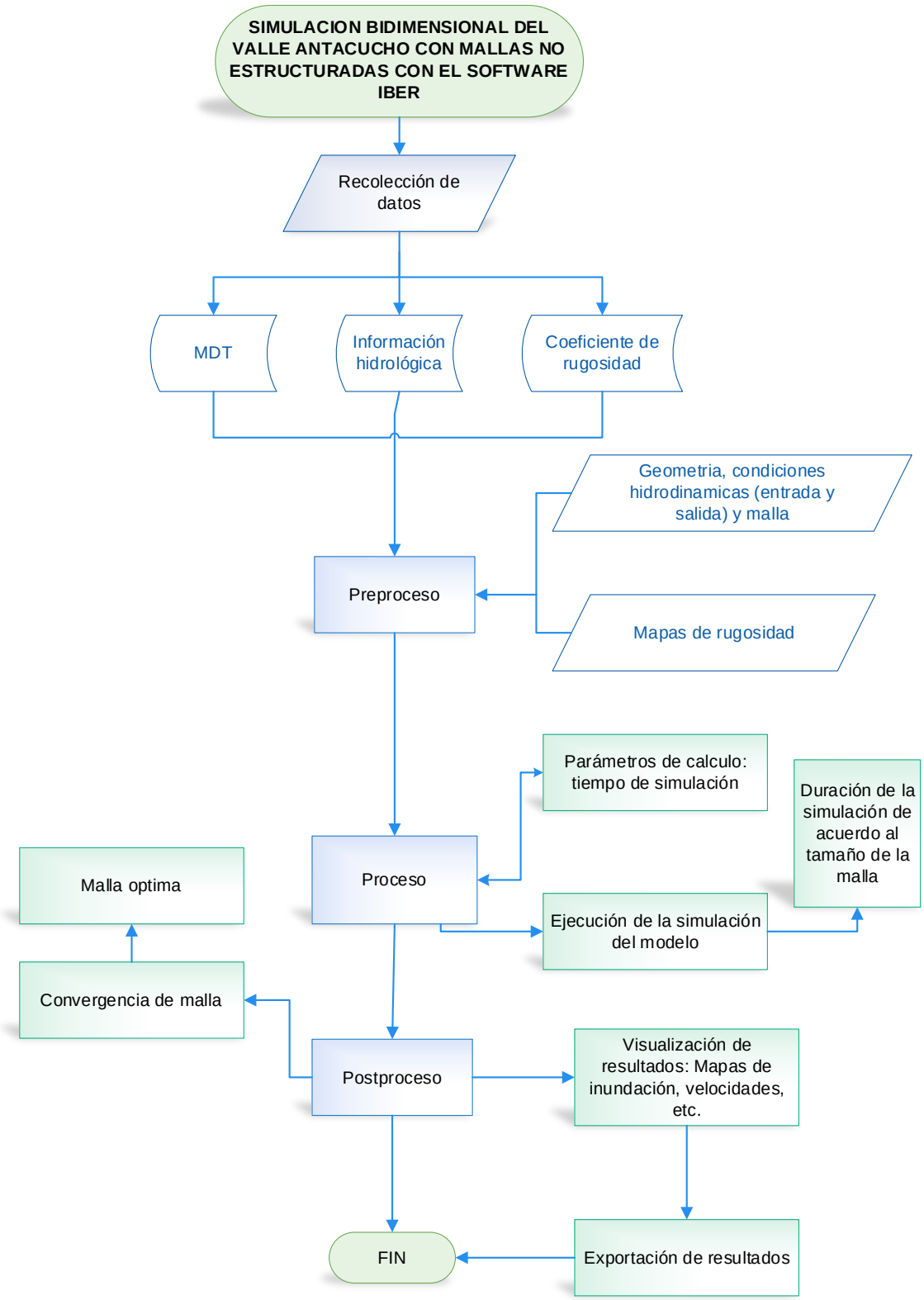
Para efectuar las simulaciones en IBER, es necesario considerar tres etapas principales dentro del proceso de modelación.

- **Preproceso:** En esta etapa se importa la geometría correspondiente al área de estudio y se realiza su edición a partir de las elevaciones obtenidas del Modelo Digital del Terreno (MDT). Posteriormente, se incorporan las condiciones hidrodinámicas del modelo, definiendo los contornos de entrada y salida. En el contorno de entrada se asigna el caudal de máxima avenida mediante un hidrograma, y finalmente se incorporan los mapas de rugosidad para representar las características hidráulicas del terreno y del cauce.
- **Proceso:** Se ejecuta el cálculo de la simulación del modelo.
- **Postproceso:** Se visualiza los mapas de velocidades máximas y áreas de inundación.

Para un mejor entendimiento se elaboró un flujograma de la simulación.

Figura 24

Diagrama de metodología para mallas no estructuradas



Nota. Se muestra el diagrama o pasos a seguir para la simulación en software IBER.

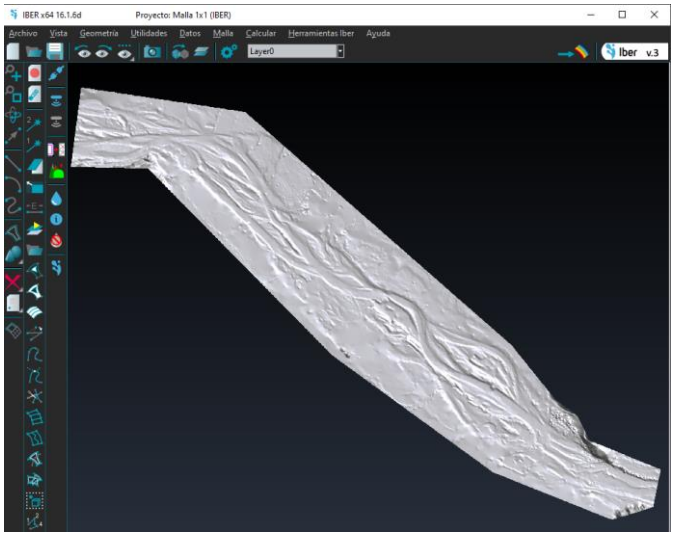
2.6.5.3. Preproceso

Para el proceso de simulación en IBER, es necesario incorporar el área de estudio y el Modelo Digital del Terreno (MDT). Para ello, se delimitó previamente el área de estudio utilizando el ortomosaico obtenido del levantamiento topográfico, el cual fue procesado y digitalizado mediante el programa ArcGIS versión 10.8, generándose en formato

Posteriormente, se generó la malla no estructurada sobre la geometría exportada del área de estudio. Para el presente proyecto, se consideraron tamaños de malla de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m y 5 m, con la finalidad de evaluar la influencia de la resolución de la malla en los resultados de la simulación hidráulica.

Para editar la malla con las elevaciones, el programa IBER solo acepta archivos en formato ASCII (.asc). Para ello se utilizó el programa QGIS 3.44.9 con la herramienta convertir formato. Esta herramienta permitió convertir los archivos de TIFF a formato ASCII en coordenadas proyectadas Project CRS: EPSG:32718 – WGS 84/ UTM zona 18s, se realizó la exportación de MDT de 1, 2, 3, 4 y 5 m.

Figura 25
Geometría del área de estudio



Nota. Se muestra la geometría en vista smooth de IBER

Para el presente proyecto se realizó cinco tipos de mallas, con el cual se simulo el caudal de 749 m^3/s, en la tabla 11 se muestra el tamaño de malla no estructurada y número de elementos generados.

Tabla 11
Tamaño de malla y número de elementos

Tamaño de malla	Número de elementos
1x1	1,360,887
2x2	339,237
3x3	150,461
4x4	84,364
5x5	53,999

Para asignar el caudal total, utilizando en el régimen crítico/subcrítico, para el caudal se tiene el caudal de máxima avenida 749 m^3/s, se introducirá mediante un hidrograma para ver la variación del flujo con un comportamiento más realista. Las condiciones de entrada se asignan utilizando la función “Assing”. De la misma forma se asignó las condiciones de salida se asignó en régimen subcrítico/critico

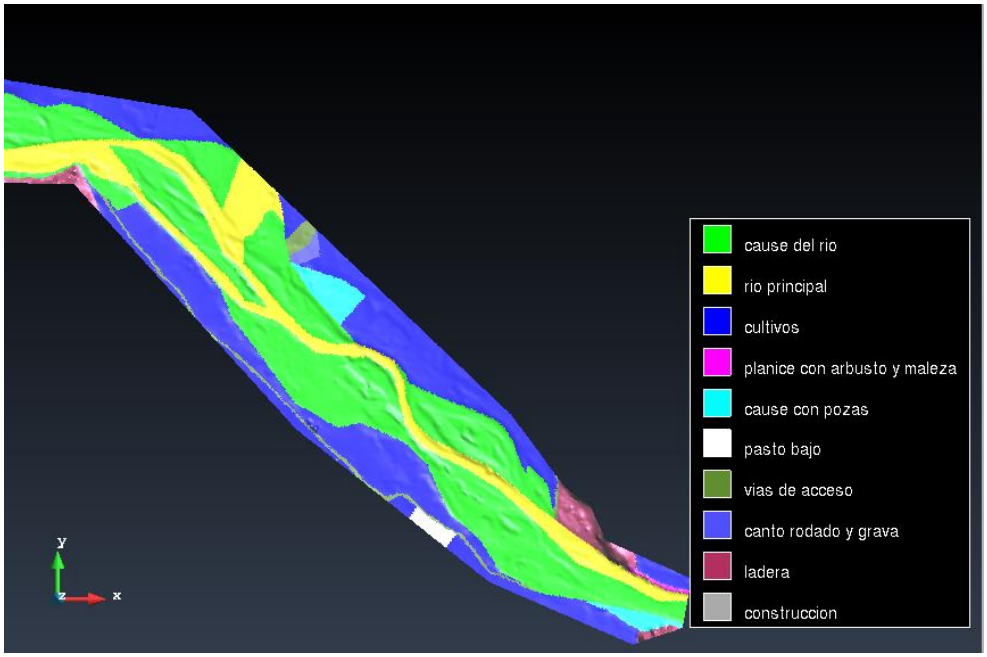
En IBER, la rugosidad hidráulica se representa mediante el coeficiente “*n*” de Manning. Para incorporar estos valores al modelo existen dos alternativas. La primera consiste en utilizar la opción “Land Use”, la cual permite definir distintos tipos de cobertura o uso de suelo y asignarlos a los elementos de la geometría. La segunda alternativa es mediante la elaboración de un mapa de rugosidades, que posteriormente se asigna de manera automática a la malla generada del modelo. En el presente estudio se optó por esta última metodología, debido a que permite una distribución más detallada y uniforme de los coeficientes de rugosidad en el área de simulación.

Según (GEASIG, 2018) para asignar automáticamente la rugosidad en IBER, se requiere realizar los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Crear un archivo en formato ASCII (.asc) con los identificadores asociados a los diferentes valores de rugosidad.
- **Paso 2:** realizar un achivo (.cv) que contenga el nombre del tipo de uso de suelo, con su respectivo identificador.
- **Paso 3:** Ingresar los tipos de uso de suelo en la base de datos de IBER.
- **Paso 4:** Asignar automáticamente sobre la malla con la herramienta “Automatic Assignation”.

Para la asignación automática de la rugosidad en la malla no estructurada creada, se debe ir a “Datos” luego a “Rugosidad” y seleccionar “Asignación automática”. En la ventana emergente se selecciona el archivo .txt y se hace clic en abrir.

Figura 26
Usos de suelo asignado en IBER



2.6.5.4. Proceso

Una vez culminada la etapa de preproceso, se procede con la ejecución del modelo y la resolución de las ecuaciones hidráulicas, etapa conocida como fase de procesamiento. Para desarrollar esta fase, es necesario considerar las capacidades del hardware del equipo utilizado en la simulación, así como los esquemas numéricos empleados para la resolución de las ecuaciones y los parámetros definidos para el correcto funcionamiento del modelo.

2.6.5.4.1. Hardware empleado.

Para la simulación se utilizó una computadora cuyas características de hardware son:

Tabla 12
Características de la computadora

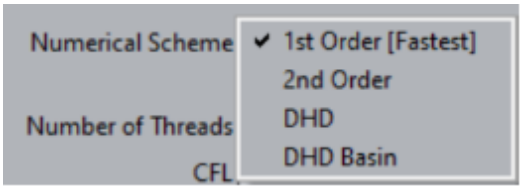
características de la computadora de simulación	
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz, 2.90 GHz
Núcleos	8
Procesadores lógicos	16
RAM instalada	16 GB
RAM Utilizable	15.9 GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650 (4 GB)

2.6.5.4.2. Esquemas numéricos de simulación.

Según Chavez (2024) Se explica que el esquema de primer orden ofrece una resolución más rápida y una mayor estabilidad, pero a costa de una menor precisión. Por otro lado, el esquema de segundo orden es menos estable, pero proporciona una mayor precisión y robustez. Los esquemas DHD y DHD Basin se emplean específicamente para análisis hidrológicos.

Para la simulación del proyecto se utilizó el esquema de primer orden (rápido), ya que se busca la estabilidad del modelo, influencia del MDT y no se requiere un enfoque hidrológico.

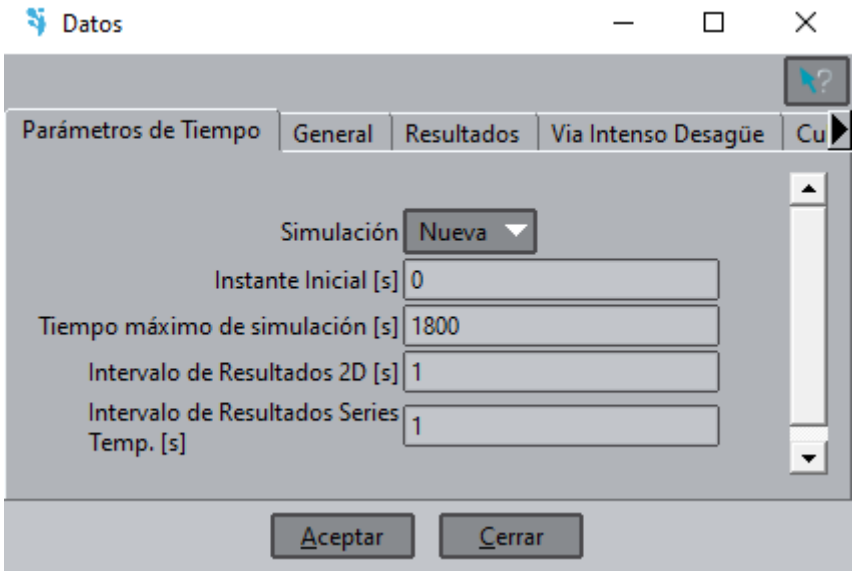
Figura 27
Esquema Numérico Seleccionado



2.6.5.4.3. Parámetros de Simulación

En este apartado, el parámetro principal corresponde al tiempo de simulación. Para el presente estudio, se estableció un tiempo inicial de cero segundos y un tiempo máximo de 1800 segundos, considerando que este intervalo permite garantizar la continuidad del flujo hasta la salida del caudal en el área de estudio. Asimismo, los resultados serán registrados cada segundo, con la finalidad de realizar un monitoreo continuo y detallado del comportamiento hidráulico durante la simulación.

Figura 28
Parámetros de Tiempo en IBER

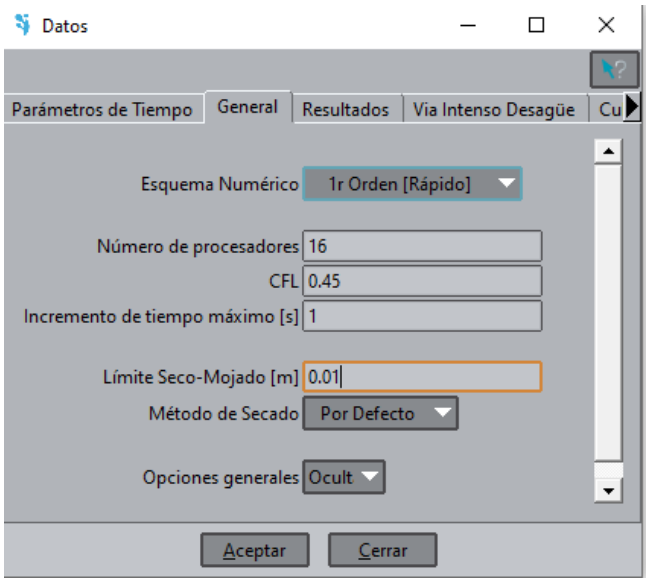


IBER utiliza el método de volúmenes finitos para la discretización espacial y un esquema explícito para la integración temporal (Bladé et al., 2014). En este enfoque, la solución hidráulica para cada intervalo de tiempo se obtiene a partir de los valores calculados en el paso anterior. Sin embargo, cuando el paso de tiempo es demasiado grande pueden generarse problemas de inestabilidad numérica en la simulación. Por ello, se utiliza el número de Courant, el cual permite controlar y limitar el paso de tiempo empleado por el programa durante la integración temporal de las ecuaciones, garantizando así la estabilidad y confiabilidad de los resultados.

Según Chavez (2024) el valor recomendado por IBER para el CFL es de 0.4 a 0.45. Además, en el estudio realizado por (Zapata Escudero, 2022) también se utilizó un valor de 0.45 para el CFL en la simulación. Por otro lado (Gomes & Garcia, 2012) probaron valores de 0.25, 0.5 y 0.75 para mallas regulares de elementos triangulares, obteniendo los mejores resultados con un valor de 0.5.

Tomando en consideración estas referencias, se optó por mantener el valor predeterminado de 0.45 asignado por IBER para el número de Courant durante las simulaciones. Del mismo modo, se estableció el número de procesadores en 16 y se conservaron los demás parámetros predeterminados establecidos por el programa.

Figura 29
Parámetros Generales en IBER

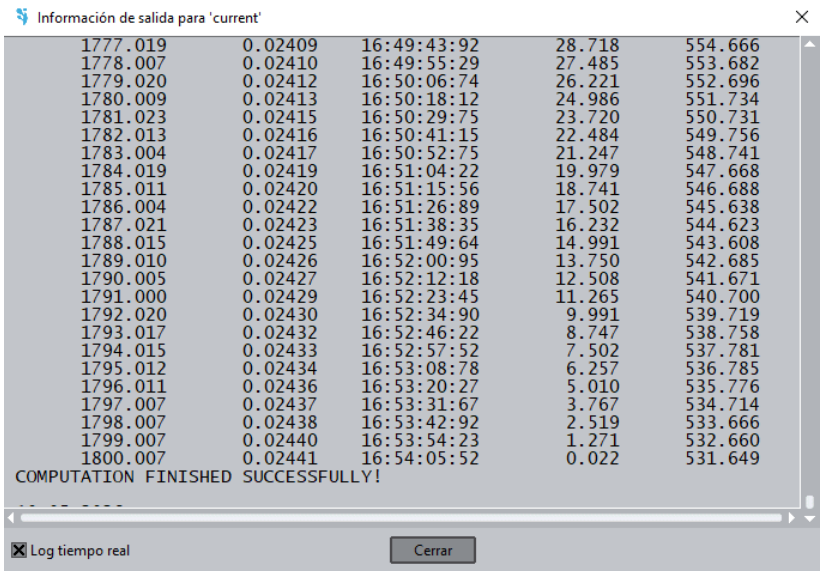


2.6.5.4.4. Cálculo de la simulación

Se procede a ejecutar el modelo desde la pestaña “Calculo”. Asimismo, mediante la herramienta “Ver información de proceso”, es posible visualizar el avance de la simulación, cuyo tiempo de ejecución dependerá de la cantidad de elementos considerados en el modelo.

Al finalizar nos muestra la pantalla de resultados con el tiempo de ejecución de inicio a fin y los caudales de salida e ingreso.

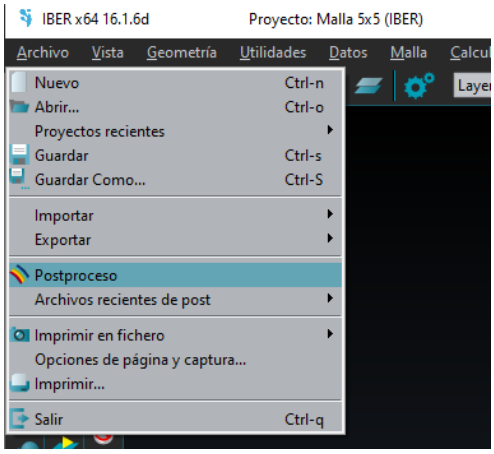
Figura 30
Proceso de simulación en IBER



2.6.5.5. Post-proceso

Una terminando el cálculo se accede al interfaz de postproceso en el cual se puede visualizar los resultados de calado y velocidad y exportar los resultados.

Figura 31
Post-proceso en IBER



2.6.6. Análisis de convergencia de malla

El análisis de convergencia se realizó mediante el Índice de Convergencia de Malla (GCI), la relación de convergencia asintótica y el orden observado de convergencia (p), siguiendo el procedimiento propuesto por (Roache, 1998).

Para este cálculo se considerarán los valores máximos de debido a que los valores mínimos se mantienen constantes en las simulaciones realizadas con mallas estructuradas y no estructuradas. El análisis se llevará a cabo utilizando las mallas de 1×1 m, 2×2 m y 3×3 m, debido a que presentan un comportamiento de convergencia adecuado. Por el contrario, las mallas de 4×4 m y 5×5 m no serán consideradas, ya que muestran resultados más alejados respecto a las mallas más refinadas y presentan órdenes de convergencia fuera del rango aceptable.

Para el cálculo se tiene que seguir los siguientes pasos y se deben usar las siguientes ecuaciones:

- Para el cálculo de razón de refinamiento se usa la (Ec. 14,15).
- Para el cálculo de orden de convergencia se usa la (Ec. 13).
- Para el cálculo de índice de convergencia de malla se usa la (Ec. 17).

- Y por último se tiene el valor de convergencia de malla mediante los GCI se usa la ecuación (Ec. 19).

Los cálculos se realizarán utilizando los resultados obtenidos de los modelos con mallas estructuradas y no estructuradas. A partir de este análisis, se evaluará la convergencia de las soluciones y se determinará la confiabilidad y estabilidad numérica de los modelos desarrollados.

2.6.7. Análisis de costos incrementales computacionales

Como último paso, se calculará el costo computacional, expresado como el porcentaje de incremento entre los diferentes refinamientos de malla, con el fin de identificar la malla más eficiente en términos de precisión y demanda computacional. Para ello, se utilizará la ecuación (Ec. 20).

Este análisis permitió evaluar el incremento relativo del esfuerzo computacional asociado al refinamiento progresivo de la malla.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Elaboración de modelos hidráulicos

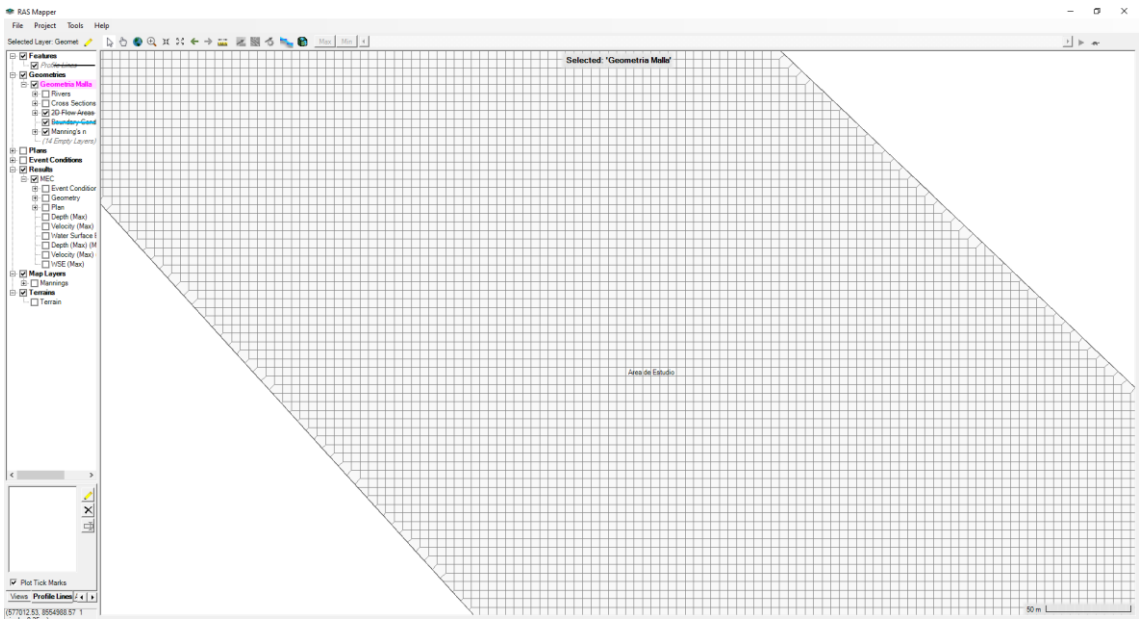
3.1.1. Malla estructurada en HEC-RAS

El programa HEC-RAS se creó la geometría en el área de estudio de 0.59 km^2 con malla estructurada de 1x1, 2x2, 3x3, 4x4 y 5x5.

En la tabla 8 se tiene que la cantidad de elementos de mallas generadas en el área de estudio, es inversamente proporcional con el tamaño de la malla, mientras el tamaño de la malla sea menor, mayor es el número de elementos de malla generado.

La diferencia entre el número de elementos de la malla 1x1 y malla 5x5 es de 567,285 elementos, esto significa que la malla 1x1 representa con mayor detalle la geometría del terreno que la malla 5x5.

Figura 32
Malla estructurada



Nota: Se muestra una malla 5x5 estructurada en el terreno, esta se ira refinando hasta llegar a la malla 1x1.

3.1.2. Malla no estructurada en IBER.

En el programa IBER se creó la geometría en el área de estudio de 0.59 km^2 con malla no estructurada de 1x1m, 2x2m, 3x3m, 4x4m y 5x5m.

En la tabla 11 se observa que el número de elementos generados en el programa IBER varía considerablemente según el tamaño de malla utilizado. Para la malla de 1×1 m se generaron 1,360,887 elementos, mientras que para la malla de 5×5 m únicamente se obtuvieron 53,999 elementos. Esta diferencia se debe a que, al emplear tamaños de malla menores, el área de estudio se discretiza en una mayor cantidad de elementos triangulares, permitiendo una representación más detallada de la geometría y del terreno.

En las figuras 33,34 y 35 muestra los detalles de la topografía.

Figura 33
Malla no estructurada 1x1

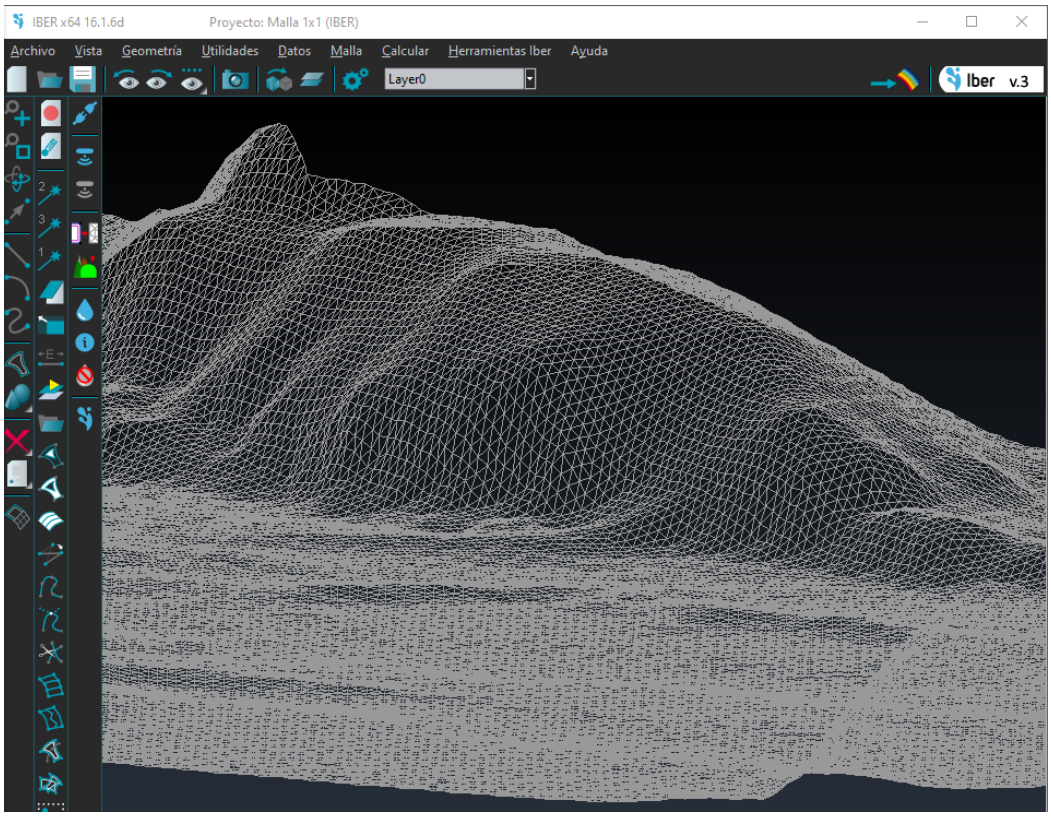


Figura 34
Malla no estructurada 3x3

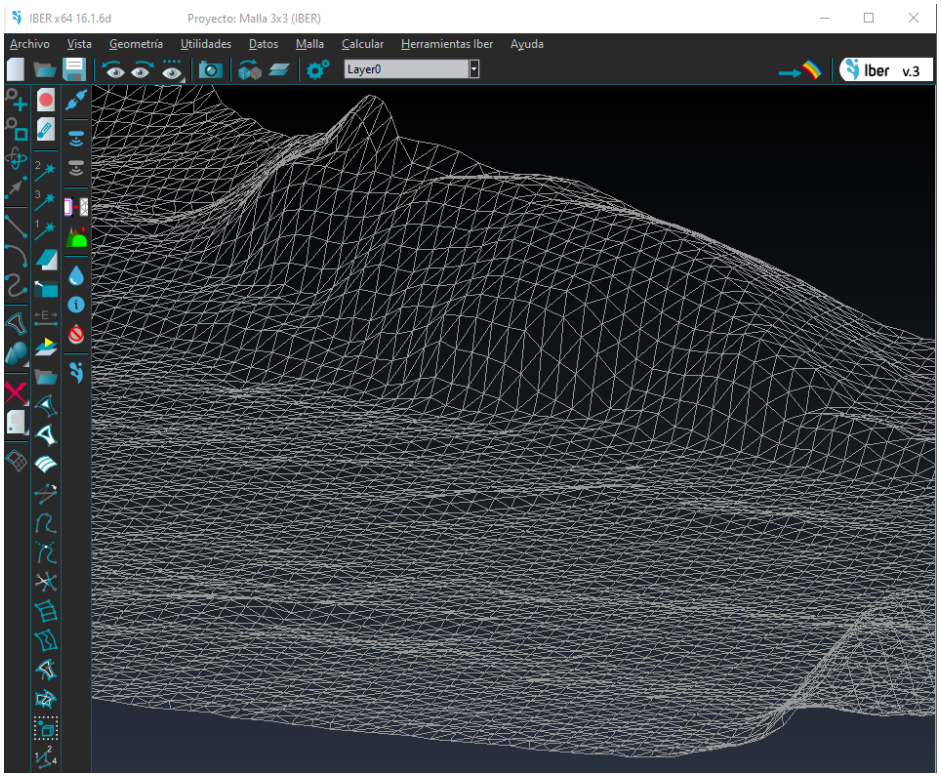
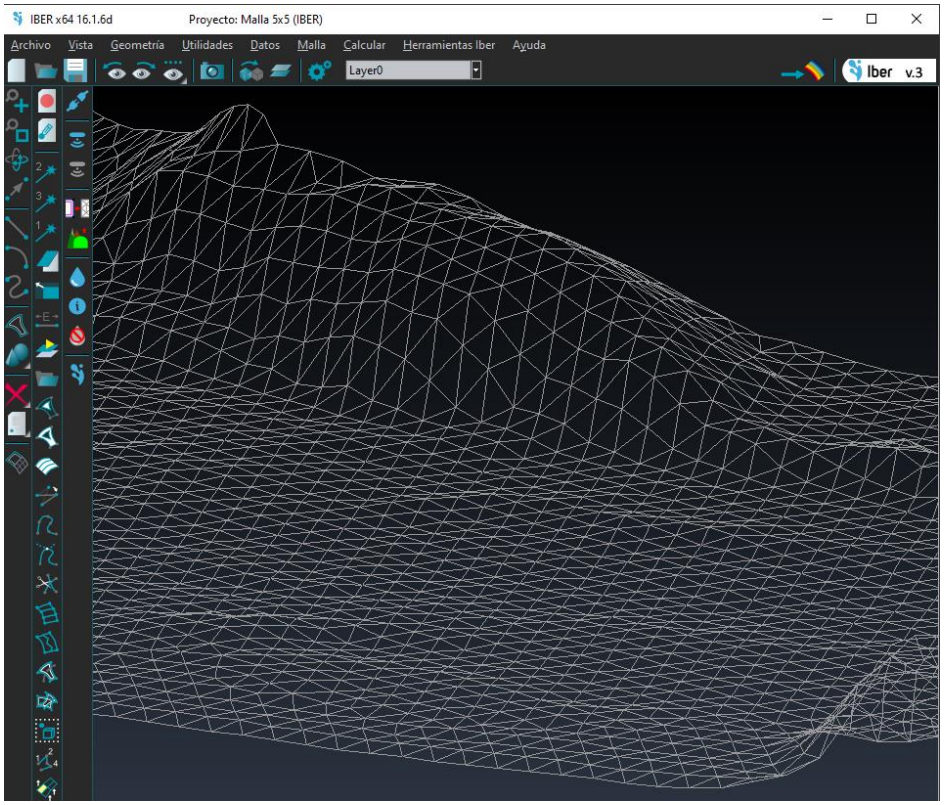


Figura 35
Malla no estructurada 5x5



3.2. Resultados Hidráulicos de las simulaciones

3.2.1. Resultados de mallas estructuradas - HEC-RAS

Se muestran los resultados de valores máximos, mínimos y promedio de todo el modelo.

Tabla 13
Resultados de calado en mallas estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Calado máximo (m)	Calado mínimo (m)	Calado promedio (m)
1	1x1	HR1-M1x1	4.36	0.00098	2.18
	2x2	HR1-M2x2	4.40	0.00098	2.20
	3x3	HR1-M3x3	4.50	0.00098	2.25
	4x4	HR1-M4x4	4.58	0.00098	2.29
	5x5	HR1-M5x5	4.62	0.00098	2.31
2	1x1	HR2-M1x1	4.11	0.00098	2.05
	2x2	HR2-M2x2	4.17	0.00098	2.09
	3x3	HR2-M3x3	4.27	0.00098	2.14
	4x4	HR2-M4x4	4.36	0.00098	2.18
	5x5	HR2-M5x5	4.39	0.00098	2.20
3	1x1	HR3-M1x1	4.06	0.00098	2.03
	2x2	HR3-M2x2	4.11	0.00098	2.06
	3x3	HR3-M3x3	4.22	0.00098	2.11
	4x4	HR3-M4x4	4.24	0.00098	2.12
	5x5	HR3-M5x5	4.26	0.00098	2.13
4	1x1	HR4-M1x1	4.00	0.00098	2.00
	2x2	HR4-M2x2	4.03	0.00098	2.01
	3x3	HR4-M3x3	4.11	0.00098	2.05
	4x4	HR4-M4x4	4.14	0.00098	2.07
	5x5	HR4-M5x5	4.11	0.00098	2.06
5	1x1	HR5-M1x1	3.95	0.00098	1.97
	2x2	HR5-M2x2	3.96	0.00098	1.98
	3x3	HR5-M3x3	4.04	0.00098	2.02
	4x4	HR5-M4x4	4.07	0.00098	2.04
	5x5	HR5-M5x5	4.06	0.00098	2.03

Nota. Se muestra el calado en m en los diferentes escenarios.

De la tabla 13 los resultados de las simulaciones hidráulicas en mallas estructuradas muestran que los valores de calado máximo y promedio presentan una tendencia general de incremento conforme aumenta la malla, y el calado mínimo permanece constante en todos los escenarios, de la misma forma se observa una tendencia similar en incrementos menos pronunciados al aumento de la resolución del MDT de 5m a 1m. Según Horritt & Bates (2001) indican que las mallas más gruesas pueden alterar la representación de la conectividad hidráulica y producir variaciones en los niveles de inundación debido a la pérdida de detalle topográfico.

Tabla 14

Resultados de velocidad en mallas estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
1	1x1	HR1-M1x1	21.60	0.00019	10.80
	2x2	HR1-M2x2	12.85	0.00286	6.42
	3x3	HR1-M3x3	9.84	0.00256	4.92
	4x4	HR1-M4x4	9.08	0.00135	4.54
	5x5	HR1-M5x5	8.86	0.00240	4.43
2	1x1	HR2-M1x1	21.42	0.00127	10.71
	2x2	HR2-M2x2	13.67	0.00140	6.84
	3x3	HR2-M3x3	9.54	0.00058	4.77
	4x4	HR2-M4x4	8.83	0.00295	4.42
	5x5	HR2-M5x5	8.87	0.00301	4.44
3	1x1	HR3-M1x1	20.91	0.00198	10.46
	2x2	HR3-M2x2	13.46	0.00071	6.73
	3x3	HR3-M3x3	9.78	0.00303	4.89
	4x4	HR3-M4x4	8.83	0.00163	4.42
	5x5	HR3-M5x5	8.94	0.00204	4.47
4	1x1	HR4-M1x1	20.93	0.00464	10.47
	2x2	HR4-M2x2	12.73	0.00213	6.37
	3x3	HR4-M3x3	10.19	0.00193	5.10
	4x4	HR4-M4x4	9.16	0.00206	4.58
	5x5	HR4-M5x5	8.89	0.00297	4.45
5	1x1	HR5-M1x1	16.88	0.00245	8.44
	2x2	HR5-M2x2	12.73	0.00418	6.37
	3x3	HR5-M3x3	8.75	0.00138	4.38
	4x4	HR5-M4x4	9.41	0.00304	4.71
	5x5	HR5-M5x5	8.56	0.00085	4.28

Nota. Se muestra la velocidad en m/s en los diferentes escenarios.

De la tabla 14 los resultados de las simulaciones hidráulicas en mallas estructuradas muestran que los valores de velocidades máximas y promedio presentan una tendencia

decreciente conforme aumenta la malla, y las velocidades mínimas presentan variaciones reducidas, este comportamiento se repite en todos los MDT analizados.

Según Horritt & Bates (2001) señalan que la resolución espacial influye significativamente en la representación de los procesos hidráulicos, especialmente en la estimación de velocidades y patrones de circulación del flujo.

Tabla 15
Resultados de área inundada en mallas estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Área Inundada (ha)
1	1x1	HR1-M1x1	35.49
	2x2	HR1-M2x2	35.05
	3x3	HR1-M3x3	35.3
	4x4	HR1-M4x4	35.35
	5x5	HR1-M5x5	35.2
2	1x1	HR2-M1x1	35.45
	2x2	HR2-M2x2	35.04
	3x3	HR2-M3x3	35.24
	4x4	HR2-M4x4	35.29
	5x5	HR2-M5x5	35.15
3	1x1	HR3-M1x1	35.43
	2x2	HR3-M2x2	34.93
	3x3	HR3-M3x3	35.48
	4x4	HR3-M4x4	35.19
	5x5	HR3-M5x5	35.12
4	1x1	HR4-M1x1	35.39
	2x2	HR4-M2x2	34.87
	3x3	HR4-M3x3	35.15
	4x4	HR4-M4x4	35.16
	5x5	HR4-M5x5	35.03
5	1x1	HR5-M1x1	35.48
	2x2	HR5-M2x2	35.04
	3x3	HR5-M3x3	35.18
	4x4	HR5-M4x4	35.24
	5x5	HR5-M5x5	69.94

Nota. Se muestra el área inundada en los diferentes escenarios

De la tabla 15 los resultados de área inundada permanecen constante en la mayoría de los escenarios evaluados, la diferencia entre tamaños de malla y resolución de MDT son mínimas lo cual indica una baja sensibilidad de esta variable. (Cook & Merwade, 2009)

señalan que la influencia de la resolución espacial sobre el área inundada es generalmente menor que sobre las velocidades y profundidades, debido a que la extensión de la inundación depende principalmente de la topografía global y del volumen de agua disponible, mientras que las variables hidráulicas locales responden con mayor sensibilidad a los cambios en la discretización.

Los mapas del calado y la velocidad se encuentran adjuntados en el anexo a su vez estas representan el área de inundación.

3.2.2. Resultados de mallas no estructuradas – IBER

Tabla 16

Resultados de calado en mallas no estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Calado máximo (m)	Calado mínimo (m)	Calado promedio (m)
1	1x1	IR1-M1x1	4.34	0.01000	2.18
	2x2	IR1-M2x2	4.08	0.01000	2.05
	3x3	IR1-M3x3	4.00	0.01000	2.00
	4x4	IR1-M4x4	4.03	0.01000	2.02
	5x5	IR1-M5x5	3.84	0.01000	1.93
2	1x1	IR2-M1x1	4.28	0.01000	2.14
	2x2	IR2-M2x2	4.15	0.01000	2.08
	3x3	IR2-M3x3	3.97	0.01000	1.99
	4x4	IR2-M4x4	4.00	0.01000	2.01
	5x5	IR2-M5x5	3.81	0.01000	1.91
3	1x1	IR3-M1x1	4.25	0.01000	2.13
	2x2	IR3-M2x2	4.15	0.01000	2.08
	3x3	IR3-M3x3	3.96	0.01000	1.99
	4x4	IR3-M4x4	3.95	0.01000	1.98
	5x5	IR3-M5x5	3.80	0.01003	1.91
4	1x1	IR4-M1x1	4.22	0.01000	2.11
	2x2	IR4-M2x2	4.18	0.01000	2.09
	3x3	IR4-M3x3	4.05	0.01000	2.03
	4x4	IR4-M4x4	3.92	0.01000	1.97
	5x5	IR4-M5x5	3.84	0.01000	1.93
5	1x1	IR5-M1x1	4.23	0.01000	2.12
	2x2	IR5-M2x2	4.08	0.01000	2.04
	3x3	IR5-M3x3	3.98	0.01000	2.00
	4x4	IR5-M4x4	3.86	0.01000	1.94
	5x5	IR5-M5x5	3.79	0.01000	1.90

Nota. Se muestra el calado en m en los diferentes escenarios.

De la tabla 16 los resultados de calado máximo y promedio se tiene una tendencia general de disminución conforme aumenta el tamaño de malla y los calados mínimos se mantienen constantes en todos los escenarios, asimismo las diferencia entre MDT son pequeñas en comparación con las variaciones de tamaño de malla.

Esto se debe a que al aumentar la el tamaño de malla se simplifica la geometría y se pierde el detalle topográfico lo cual confirma lo mencionado por Cook & Merwade (2009), quienes indican que la resolución espacial del modelo influye directamente en la representación de las características topográficas responsables de controlar la acumulación y distribución del agua.

Tabla 17

Resultados de velocidad en mallas no estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
1	1x1	IR1-M1x1	8.63	0.00266	4.32
	2x2	IR1-M2x2	8.72	0.00382	4.36
	3x3	IR1-M3x3	8.75	0.00948	4.38
	4x4	IR1-M4x4	13.76	0.00267	6.88
	5x5	IR1-M5x5	13.13	0.00460	6.57
2	1x1	IR2-M1x1	9.06	0.00245	4.53
	2x2	IR2-M2x2	9.83	0.00244	4.92
	3x3	IR2-M3x3	11.40	0.00256	5.70
	4x4	IR2-M4x4	13.33	0.00267	6.66
	5x5	IR2-M5x5	14.79	0.00264	7.40
3	1x1	IR3-M1x1	9.10	0.00244	4.55
	2x2	IR3-M2x2	9.12	0.00246	4.56
	3x3	IR3-M3x3	10.38	0.00251	5.19
	4x4	IR3-M4x4	11.57	0.00279	5.79
	5x5	IR3-M5x5	13.84	0.00374	6.92
4	1x1	IR4-M1x1	9.14	0.00243	4.57
	2x2	IR4-M2x2	8.84	0.00245	4.42
	3x3	IR4-M3x3	10.02	0.00243	5.01
	4x4	IR4-M4x4	10.69	0.00253	5.35
	5x5	IR4-M5x5	16.89	0.00278	8.45
5	1x1	IR5-M1x1	9.06	0.00240	4.53
	2x2	IR5-M2x2	8.83	0.00234	4.42
	3x3	IR5-M3x3	11.21	0.00245	5.61
	4x4	IR5-M4x4	9.27	0.00178	4.64
	5x5	IR5-M5x5	18.60	0.00249	9.30

Nota. Se muestra la velocidad en m/s en los diferentes escenarios.

De la tabla 17 los resultados de las simulaciones hidráulicas en mallas no estructuradas muestran que los valores de velocidades máximas y promedio presentan una tendencia general de incremento conforme aumenta la malla, y las velocidades mínimas permanecen constantes en todos los escenarios, para los MDT varia de la misma forma, pero en variaciones mínimas. Esto se debe a que la resolución espacial tiene una influencia significativa en la simulación de velocidades debido a la sensibilidad de esta variable frente a las modificaciones en la geometría y pendiente del terreno (Horritt & Bates, 2001).

Tabla 18

Resultados de área inundada en mallas no estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Área Inundada (ha)
1	1x1	IR1-M1x1	38.41
	2x2	IR1-M2x2	38.19
	3x3	IR1-M3x3	38.5
	4x4	IR1-M4x4	39.18
	5x5	IR1-M5x5	38.95
2	1x1	IR2-M1x1	38.11
	2x2	IR2-M2x2	38.03
	3x3	IR2-M3x3	38.34
	4x4	IR2-M4x4	38.99
	5x5	IR2-M5x5	38.81
3	1x1	IR3-M1x1	37.8
	2x2	IR3-M2x2	37.86
	3x3	IR3-M3x3	38.1
	4x4	IR3-M4x4	38.88
	5x5	IR3-M5x5	38.77
4	1x1	IR4-M1x1	37.45
	2x2	IR4-M2x2	37.53
	3x3	IR4-M3x3	37.86
	4x4	IR4-M4x4	38.62
	5x5	IR4-M5x5	38.72
5	1x1	IR5-M1x1	37.34
	2x2	IR5-M2x2	37.47
	3x3	IR5-M3x3	37.73
	4x4	IR5-M4x4	38.57
	5x5	IR5-M5x5	38.54

Nota. Se muestra el área inundada en los diferentes escenarios

De la tabla 18 se tiene los resultados de área inundada lo cual presenta una tendencia general de incremento conforme va aumentando el tamaño de malla y al aumento de la resolución de MDT. Cook & Merwade (2009) menciona que las resoluciones más gruesas pueden generar sobreestimaciones de la extensión inundada al suavizar elementos topográficos que limitan lateralmente la expansión del flujo

Los mapas del calado y la velocidad se encuentran adjuntados en el anexo a su vez estas representan el área de inundación.

3.3. Evaluación de las características hidráulicas.

El GCI es una métrica ampliamente utilizada para evaluar la incertidumbre numérica asociada al refinamiento de malla y determinar si una solución se encuentra dentro de la región asintótica de convergencia propuesta por (Roache, 1998).

3.3.1. Análisis de convergencia del modelo en calado

Tabla 19
Índice de convergencia de mallas de calado en mallas estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Calado máximo (m)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	HR1-M1x1	1	4.36	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.61%**	4.36
	HR1-M2x2	2	4.40	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.68%**	
	HR1-M3x3	3	4.50	p_1-2	1.46	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR1-M4x4	4	4.58	p_2-3	2.50			
	HR1-M5x5	5	4.62					
2	HR2-M1x1	1	4.11	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.78%**	4.07
	HR2-M2x2	2	4.17	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**4.58%**	
	HR2-M3x3	3	4.27	p_1-2	0.74	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR2-M4x4	4	4.36	p_2-3	1.27			
	HR2-M5x5	5	4.39					
3	HR3-M1x1	1	4.06	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.19%**	4.05
	HR3-M2x2	2	4.11	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.61%**	
	HR3-M3x3	3	4.22	p_1-2	1.16	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR3-M4x4	4	4.24	p_2-3	1.97			
	HR3-M5x5	5	4.26					
4	HR4-M1x1	1	4.00	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.54%**	3.99
	HR4-M2x2	2	4.03	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.45%**	
	HR4-M3x3	3	4.11	p_1-2	1.44	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR4-M4x4	4	4.14	p_2-3	2.47			
	HR4-M5x5	5	4.11					

5	HR5-M1x1	1	3.95	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.04%**	3.95
	HR5-M2x2	2	3.96	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.34%**	
	HR5-M3x3	3	4.04	p_1-2	3.14	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.00**	
	HR5-M4x4	4	4.07	p_2-3	5.37			
	HR5-M5x5	5	4.06					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

En la tabla 19, las mallas estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica entre 0.99 y 1.00, indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los valores de GCI son bajos (0.04 %–4.58 %), lo que evidencia una reducida incertidumbre asociada al error de discretización. Los MDT de 1 m, 3 m y 4 m muestran un comportamiento de convergencia más consistente, mientras que el MDT de 5 m, aunque presenta bajos valores de GCI, registra órdenes aparentes de convergencia superiores a 3, por lo que sus resultados deben interpretarse con cautela.

Tabla 20

Índice de convergencia de mallas del calado en mallas no estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Calado máximo (m)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	IR1-M1x1	1	4.34	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**11.01%**	4.05
	IR1-M2x2	2	4.08	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**3.73%**	
	IR1-M3x3	3	4.00	p_1-2	-1.65	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.06**	
	IR1-M4x4	4	4.03	p_2-3	-2.82			
	IR1-M5x5	5	3.84					
2	IR2-M1x1	1	4.28	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**11.06%**	4.44
	IR2-M2x2	2	4.15	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**15.40%**	
	IR2-M3x3	3	3.97	p_1-2	0.43	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.03**	
	IR2-M4x4	4	4.00	p_2-3	0.74			
	IR2-M5x5	5	3.81					
3	IR3-M1x1	1	4.25	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.92%**	4.28
	IR3-M2x2	2	4.15	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**5.87%**	
	IR3-M3x3	3	3.96	p_1-2	0.98	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.02**	
	IR3-M4x4	4	3.95	p_2-3	1.67			
	IR3-M5x5	5	3.80					
4	IR4-M1x1	1	4.22	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.54%**	4.22
	IR4-M2x2	2	4.18	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.74%**	
	IR4-M3x3	3	4.05	p_1-2	1.68		**1.01**	

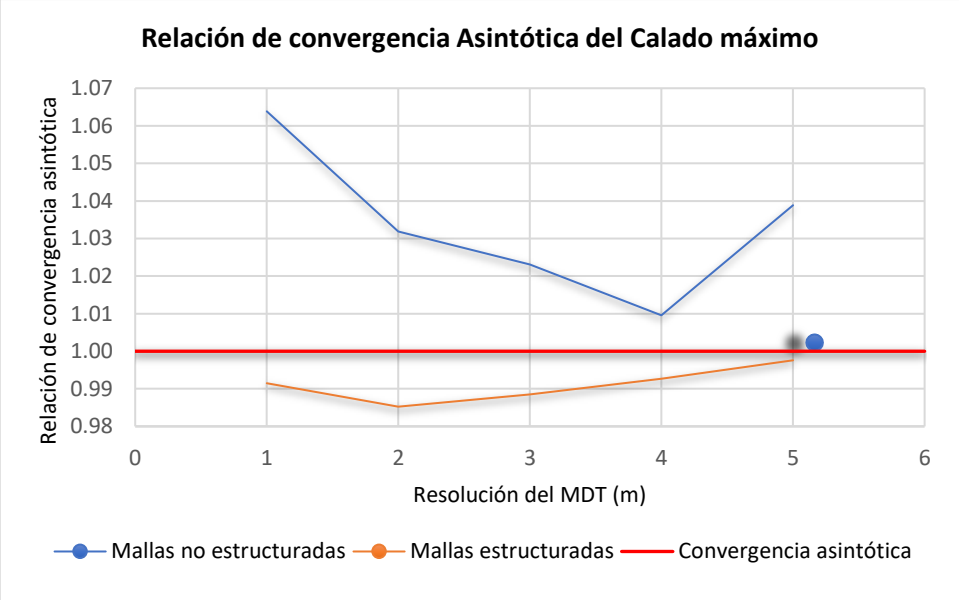
	IR4-M4x4	4	3.92	p_2-3	2.87	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR4-M5x5	5	3.84					
5	IR5-M1x1	1	4.23	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**11.46%**	3.99
	IR5-M2x2	2	4.08	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**7.05%**	
	IR5-M3x3	3	3.98	p_1-2	-0.76	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.04**	
	IR5-M4x4	4	3.86	p_2-3	-1.29			
	IR5-M5x5	5	3.79					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

En la tabla 20, las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica entre 1.01 y 1.06, indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. Los menores valores de GCI corresponden a los MDT de 3 m y 4 m, lo que evidencia una menor incertidumbre asociada al error de discretización. En contraste, los MDT de 1 m, 2 m y 5 m presentan mayores valores de GCI y órdenes aparentes de convergencia negativos o inferiores a la unidad, indicando un comportamiento de convergencia menos consistente y resultados que deben interpretarse con cautela.

Figura 36

Relación de convergencia asintótica de mallas de calado máximo



En la figura 36 se observa que la relación de convergencia asintótica de malla es próxima a la unidad, En las mallas estructuradas, los valores se mantienen entre 0.99 y 1.00 evidenciando un comportamiento uniforme durante el refinamiento de la malla. Por su parte las mallas no estructuradas presentan valores entre 1.01 y 1.06, siendo el MDT

de 4 m el más cercano a la unidad, según Roache (1998) una relación de convergencia asintótica cercana a la unidad indica que la solución se encuentra próxima al régimen de convergencia asintótica; adicionalmente, valores bajos del GCI evidencian una menor incertidumbre asociada al error de discretización.

3.3.2. Análisis de convergencia del modelo en velocidad

Este parámetro presenta una alta sensibilidad frente a las variaciones topográficas y a las diferentes resoluciones del MDT, debido a que pequeños cambios en la geometría del terreno pueden generar diferencias significativas en la distribución y magnitud de las velocidades simuladas.

Tabla 21

Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Velocidad Máxima (m/s)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	HR1-M1x1	1	21.60	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**77.10%**	11.68
	HR1-M2x2	2	12.85	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**44.47%**	
	HR1-M3x3	3	9.84	p_1-2	-1.54	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.68**	
	HR1-M4x4	4	9.08	p_2-3	-2.64			
	HR1-M5x5	5	8.86					
2	HR2-M1x1	1	21.42	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**97.03%**	10.58
	HR2-M2x2	2	13.67	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**81.19%**	
	HR2-M3x3	3	9.54	p_1-2	-0.90	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.57**	
	HR2-M4x4	4	8.83	p_2-3	-1.55			
	HR2-M5x5	5	8.87					
3	HR3-M1x1	1	20.91	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**88.03%**	11.05
	HR3-M2x2	2	13.46	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**67.54%**	
	HR3-M3x3	3	9.78	p_1-2	-1.02	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.55**	
	HR3-M4x4	4	8.83	p_2-3	-1.74			
	HR3-M5x5	5	8.94					
4	HR4-M1x1	1	20.93	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**70.89%**	11.86
	HR4-M2x2	2	12.73	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**36.06%**	
	HR4-M3x3	3	10.19	p_1-2	-1.69	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.64**	
	HR4-M4x4	4	9.16	p_2-3	-2.89			
	HR4-M5x5	5	8.89					
5	HR5-M1x1	1	16.88	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**713.72%**	-32.37
	HR5-M2x2	2	12.73	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**905.78%**	
	HR5-M3x3	3	8.75	p_1-2	-0.06	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.33**	
	HR5-M4x4	4	9.41	p_2-3	-0.11			
	HR5-M5x5	5	8.56					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 21, los resultados de la velocidad máxima en las mallas estructuradas muestran relaciones de convergencia asintótica entre 1.33 y 1.68, alejadas de la unidad, lo que indica que las soluciones no alcanzan el régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los valores de GCI son elevados, variando entre 36.06 % y 905.78 %, evidenciando una alta incertidumbre asociada al error de discretización y una marcada sensibilidad de la velocidad máxima al refinamiento de la malla. Adicionalmente, los órdenes aparentes de convergencia presentan valores negativos en todos los MDT, indicando un comportamiento de convergencia oscilatorio. El MDT de 5 m presenta el comportamiento más desfavorable, debido a sus elevados valores de GCI y a la obtención de una solución asintótica negativa, por lo que sus resultados deben interpretarse con cautela.

Tabla 22

Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas no estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Velocidad máxima (m/s)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	IR1-M1x1	1	8.63	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.87%**	8.73
	IR1-M2x2	2	8.72	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.65%**	
	IR1-M3x3	3	8.75	p_1-2	-1.52	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	IR1-M4x4	4	13.76	p_2-3	-2.59			
	IR1-M5x5	5	13.13					
2	IR2-M1x1	1	9.06	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**10.58%**	8.80
	IR2-M2x2	2	9.83	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**19.63%**	
	IR2-M3x3	3	11.40	p_1-2	1.01	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.92**	
	IR2-M4x4	4	13.33	p_2-3	1.73			
	IR2-M5x5	5	14.79					
3	IR3-M1x1	1	9.10	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.00%**	9.10
	IR3-M2x2	2	9.12	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.28%**	
	IR3-M3x3	3	10.38	p_1-2	5.96	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.00**	
	IR3-M4x4	4	11.57	p_2-3	10.19			
	IR3-M5x5	5	13.84					
4	IR4-M1x1	1	9.14	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.43%**	9.16
	IR4-M2x2	2	8.84	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**5.76%**	
	IR4-M3x3	3	10.02	p_1-2	1.96	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.03**	
	IR4-M4x4	4	10.69	p_2-3	3.35			

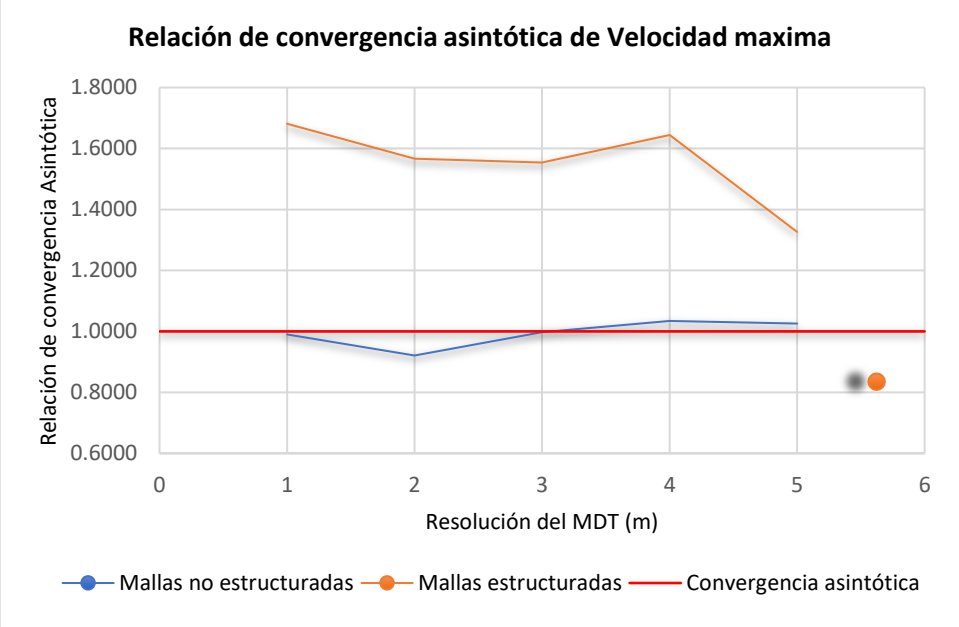
	IR4-M5x5	5	16.89					
5	IR5-M1x1	1	9.06	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.33%**	9.06
	IR5-M2x2	2	8.83	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**3.56%**	
	IR5-M3x3	3	11.21	p_1-2	3.39	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.03**	
	IR5-M4x4	4	9.27	p_2-3	5.80			
	IR5-M5x5	5	18.60					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 22, las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica entre 0.92 y 1.03, siendo los MDT de 1 m, 3 m, 4 m y 5 m los más cercanos a la unidad, lo que indica una mayor proximidad al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, estos MDT registran valores de GCI bajos, reflejando una menor incertidumbre asociada al error de discretización. En contraste, el MDT de 2 m presenta la relación de convergencia asintótica más alejada de la unidad (0.92) y los mayores valores de GCI (10.58 % y 19.63 %), evidenciando una mayor sensibilidad al refinamiento de la malla. Sin embargo, el análisis del orden aparente de convergencia muestra comportamientos atípicos en algunos MDT, por lo que los resultados deben interpretarse considerando conjuntamente todos los indicadores de convergencia.

Figura 37

Relación de convergencia asintótica de mallas de Velocidad máxima



De la figura 37 muestra que, para la velocidad máxima, las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica más cercanas a la unidad que las mallas estructuradas en la mayoría de los MDT evaluados. En particular, los MDT de 1 m y 3 m presentan valores próximos a 1, indicando una mayor proximidad al régimen de convergencia asintótica. En contraste, las mallas estructuradas registran relaciones entre 1.33 y 1.68, alejadas de la unidad, lo que evidencia un comportamiento de convergencia menos consistente para esta variable. Estos resultados indican que la velocidad máxima presenta una mayor sensibilidad al refinamiento de la malla en las mallas estructuradas que en las no estructuradas.

3.3.3. Análisis de convergencia del modelo en área de inundación.

Para el análisis de convergencia en mallas estructuradas se emplearon los resultados obtenidos del modelamiento hidráulico en HEC-RAS correspondientes al parámetro de Área de inundación.

Tabla 23
Índice de convergencia de mallas de área en mallas estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Área Inundada (ha)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	HR1-M1x1	1	35.49	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**3.62%**	34.84
	HR1-M2x2	2	35.05	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.08%**	
	HR1-M3x3	3	35.30	p_1-2	-0.82	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR1-M4x4	4	35.35	p_2-3	-1.40			
	HR1-M5x5	5	35.20					
2	HR2-M1x1	1	35.45	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.76%**	34.92
	HR2-M2x2	2	35.04	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.33%**	
	HR2-M3x3	3	35.24	p_1-2	-1.07	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR2-M4x4	4	35.29	p_2-3	-1.82			
	HR2-M5x5	5	35.15					
3	HR3-M1x1	1	35.43	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**16.25%**	37.61
	HR3-M2x2	2	34.93	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**18.25%**	
	HR3-M3x3	3	35.48	p_1-2	0.15	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR3-M4x4	4	35.19	p_2-3	0.25			
	HR3-M5x5	5	35.12					
4	HR4-M1x1	1	35.39	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**4.00%**	34.65

	HR4-M2x2	2	34.87	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.19%**	
	HR4-M3x3	3	35.15	p_1-2	-0.89			
	HR4-M4x4	4	35.16	p_2-3	-1.52	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR4-M5x5	5	35.03					
5	HR5-M1x1	1	35.48	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.26%**	34.99
	HR5-M2x2	2	35.04	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.71%**	
	HR5-M3x3	3	35.18	p_1-2	-1.69			
	HR5-M4x4	4	35.24	p_2-3	-2.88	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR5-M5x5	5	69.94					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 23, las mallas estructuradas presentan una relación de convergencia asintótica cercana a la unidad (≈1.01) para todos los MDT evaluados, indicando que las soluciones se aproximan al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los MDT de 1 m, 2 m, 4 m y 5 m presentan valores bajos de GCI, lo que evidencia una menor incertidumbre asociada al error de discretización. En contraste, el MDT de 3 m registra los mayores valores de GCI, indicando una mayor sensibilidad al refinamiento de la malla. Adicionalmente, la malla 5×5 del MDT de 5 m presenta un incremento considerable del área inundada (69.94 ha), comportamiento que puede atribuirse a la pérdida de detalle topográfico causada por el uso de una malla más gruesa, la cual reduce la capacidad de representar adecuadamente el relieve y modifica la delimitación de la inundación.

Tabla 24

Índice de convergencia de mallas de área en mallas no estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Área Inundada (ha)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	IR1-M1x1	1	38.41	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.65%**	38.62
	IR1-M2x2	2	38.19	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.37%**	
	IR1-M3x3	3	38.50	p_1-2	0.52			
	IR1-M4x4	4	39.18	p_2-3	0.88	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	IR1-M5x5	5	38.95					
2	IR2-M1x1	1	38.11	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.11%**	38.12
	IR2-M2x2	2	38.03	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.40%**	
	IR2-M3x3	3	38.34	p_1-2	1.83			
	IR2-M4x4	4	38.99	p_2-3	3.12	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.00**	
	IR2-M5x5	5	38.81					

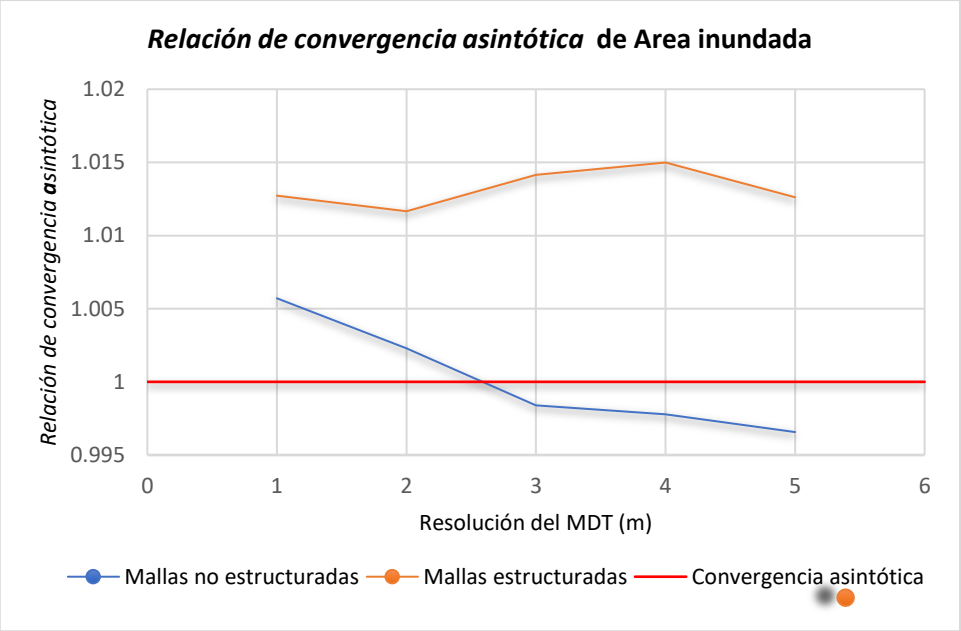
3	IR3-M1x1	1	37.80	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.07%**	37.79
	IR3-M2x2	2	37.86	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.27%**	
	IR3-M3x3	3	38.10	p_1-2	1.96	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR3-M4x4	4	38.88	p_2-3	3.36		**1.00**	
	IR3-M5x5	5	38.77					
4	IR4-M1x1	1	37.45	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.09%**	37.45
	IR4-M2x2	2	37.53	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.37%**	
	IR4-M3x3	3	37.86	p_1-2	1.99	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR4-M4x4	4	38.62	p_2-3	3.39		**1.00**	
	IR4-M5x5	5	38.72					
5	IR5-M1x1	1	37.34	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.41%**	37.30
	IR5-M2x2	2	37.47	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.84%**	
	IR5-M3x3	3	37.73	p_1-2	1.04	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR5-M4x4	4	38.57	p_2-3	1.77		**1.00**	
	IR5-M5x5	5	38.54					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 24 las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica iguales o muy próximas a la unidad (1.00–1.01), indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los valores de GCI son bajos en todos los MDT (0.07 %–2.37 %), lo que evidencia una reducida incertidumbre asociada al error de discretización. Los órdenes aparentes de convergencia muestran un comportamiento generalmente consistente, aunque algunos MDT presentan valores superiores a 3 para el segundo refinamiento, por lo que dichos resultados deben interpretarse de forma conjunta con los demás indicadores de convergencia. En conjunto, las mallas no estructuradas muestran un comportamiento de convergencia consistente para la variable área inundada.

Figura 38

Relación de convergencia asintótica de mallas de Área inundada



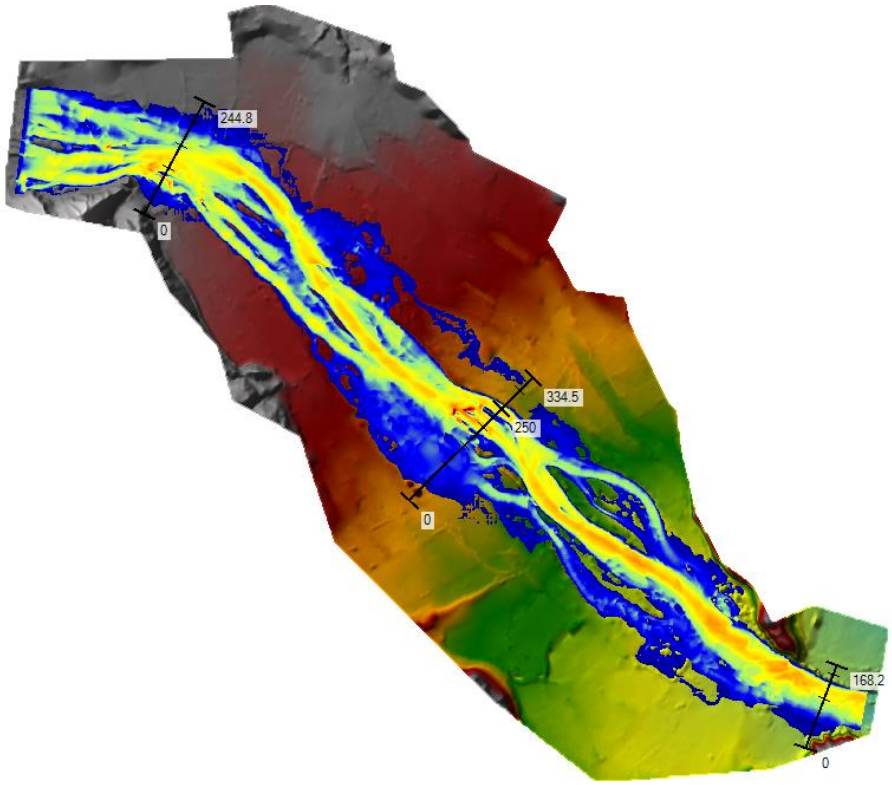
De la gráfica 38 muestra que la relación de convergencia asintótica del área inundada es cercana a la unidad para las mallas estructuradas y no estructuradas en todos los MDT evaluados, indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. En las mallas no estructuradas, los valores oscilan entre 0.997 y 1.006, mientras que en las mallas estructuradas varían entre 1.011 y 1.015. En ambos casos, las variaciones respecto al valor de referencia son reducidas, lo que evidencia un comportamiento de convergencia consistente para esta variable.

3.3.4. Análisis comparativo de secciones transversales.

Se seleccionó el MDT de 3 m porque, considerando conjuntamente los indicadores de convergencia (relación de convergencia asintótica, GCI y orden aparente de convergencia), así como el comportamiento de las variables hidráulicas analizadas (calado máximo, velocidad máxima y área inundada), presentó un comportamiento numérico consistente y un equilibrio entre la representación de la topografía y la estabilidad de los resultados. Por ello, se tomó como referencia para el análisis mediante secciones transversales.

Figura 39

Seccionamiento del modelo



Nota. Se muestra las secciones que se generaron para este análisis.

Figura 40

Sección transversal 1 en malla estructurada

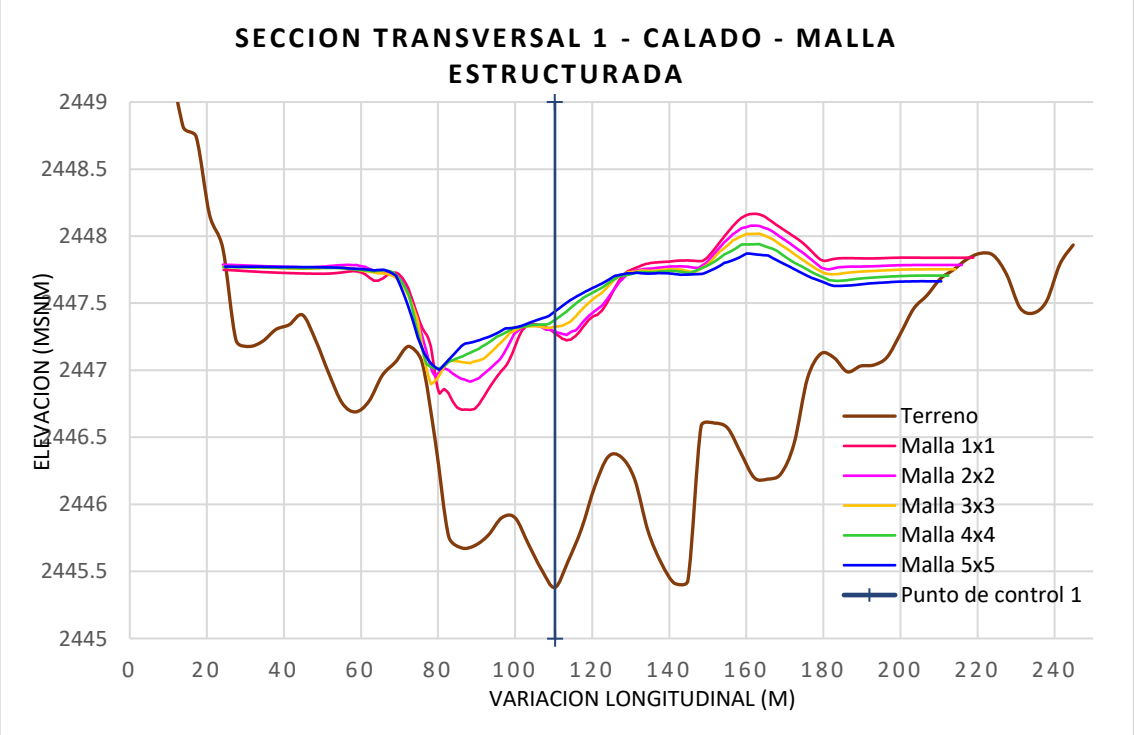


Figura 41
Sección transversal 2 en malla estructurada

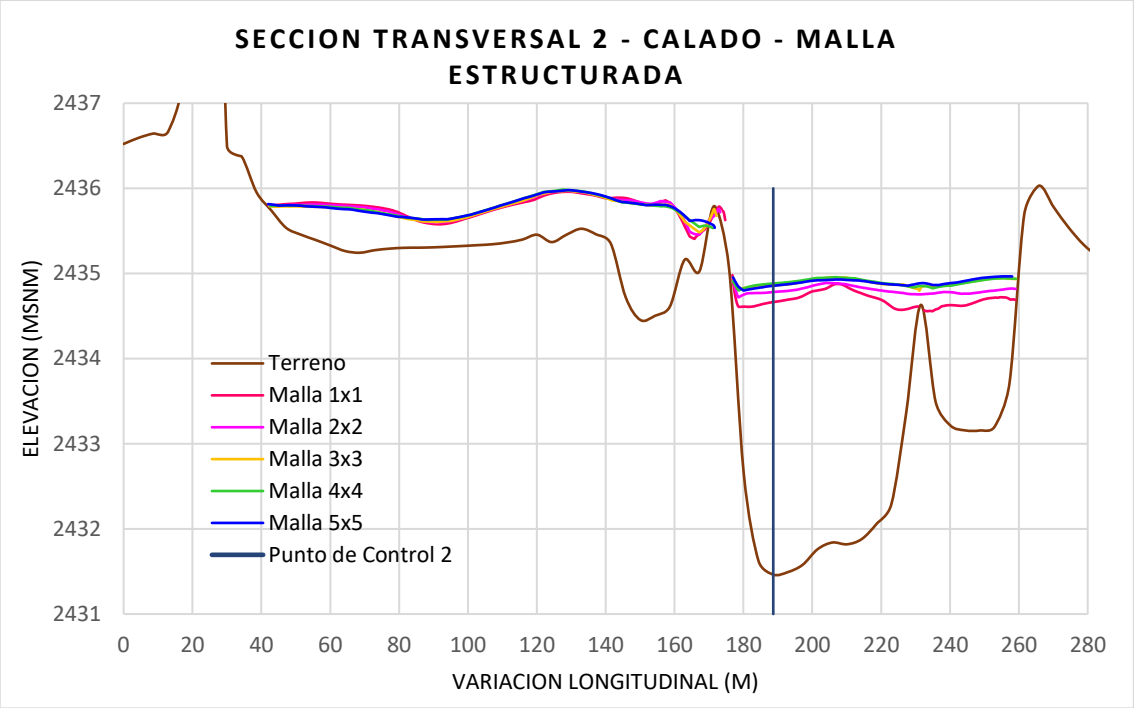


Figura 42
Sección transversal 3 en malla estructurada

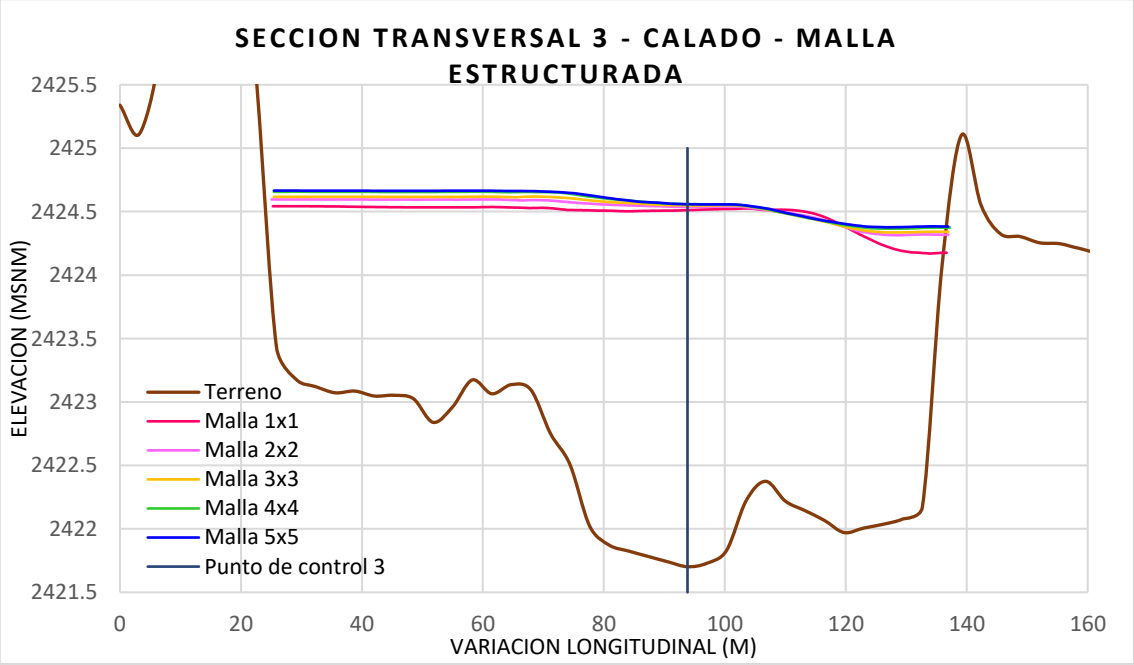


Tabla 25
Variación de cota en mallas estructuradas

Mallas estructuradas			
Malla	**Sección 1**	**Sección 2**	**Sección 3**
1	1.850	3.179	2.801
2	1.907	3.302	2.828
3	1.944	3.371	2.839
4	2.001	3.392	2.850
5	2.026	3.377	2.857
▲h	**0.176**	**0.213**	**0.056**

De la figura 40,41,42 y tabla 25, para las mallas estructuradas muestran que los perfiles de calado obtenidos con las diferentes mallas presentan una distribución similar en las tres secciones transversales evaluadas. La malla de 1×1, al representar el mayor nivel de refinamiento, constituye la referencia del análisis, observándose que las mallas de 2×2 y 3×3 reproducen perfiles muy similares, con diferencias reducidas respecto a esta. En cambio, las mallas de 4×4 y 5×5 presentan ligeras variaciones en la representación del perfil hidráulico, atribuibles a la menor capacidad de representar el relieve conforme aumenta el tamaño de la malla. Asimismo, la variación máxima de cota fue de 0.176 m, 0.213 m y 0.056 m para las secciones 1, 2 y 3, respectivamente, evidenciando que el MDT de 3 m mantiene una representación consistente del perfil hidráulico para las mallas más refinadas.

Figura 43
Sección transversal 1 en malla no estructurada

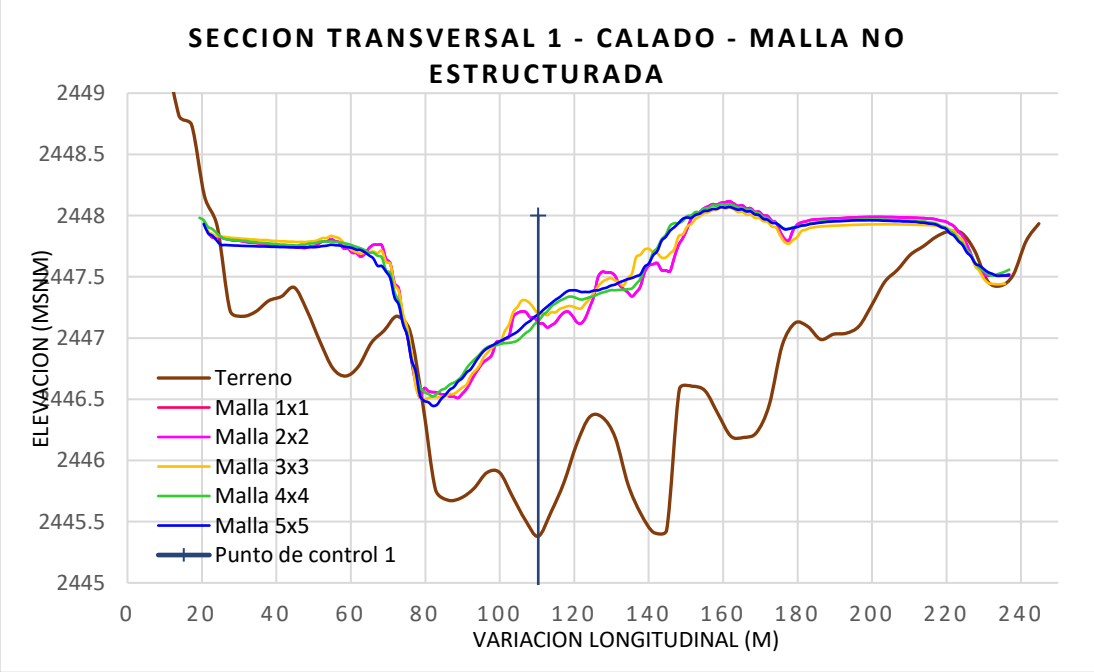


Figura 44

Sección transversal 2 en malla no estructurada

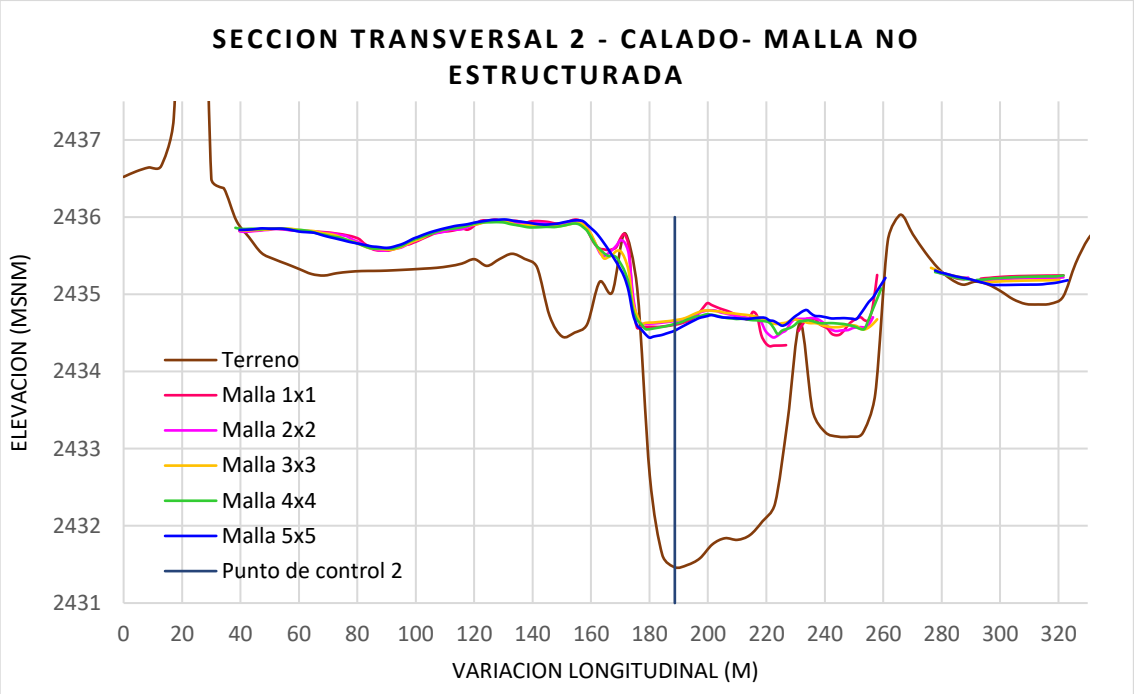


Figura 45

Sección transversal 3 en malla no estructurada

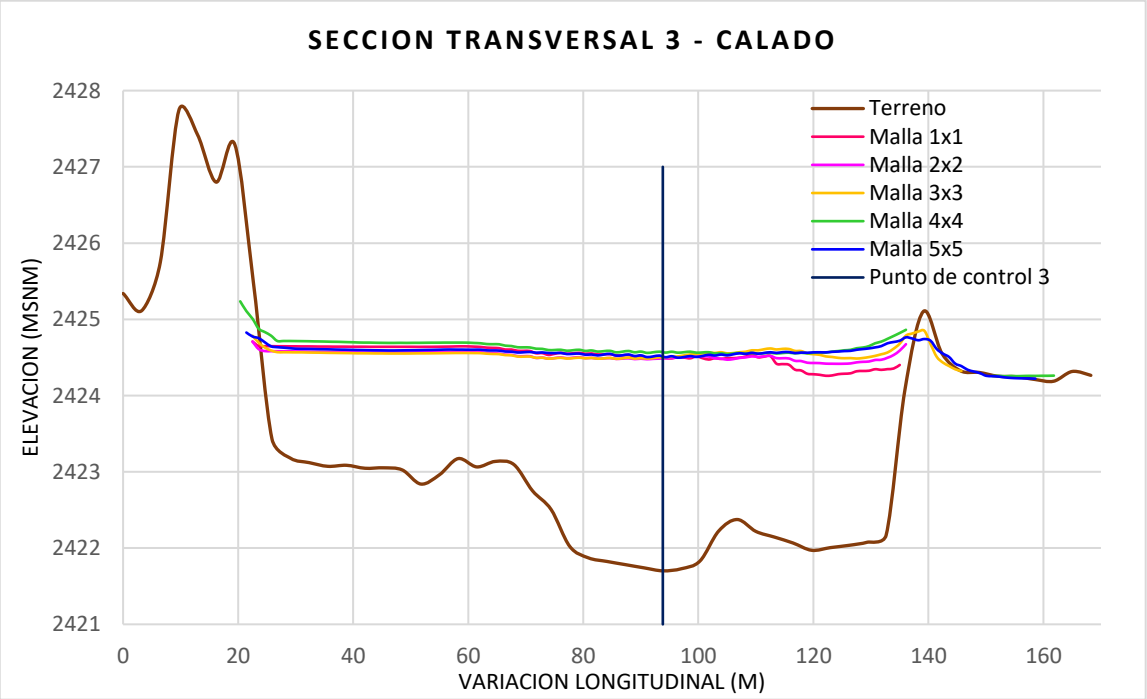


Tabla 26
Variación de cota en mallas no estructuradas

Mallas no estructuradas			
Malla	**Sección 1**	**Sección 2**	**Sección 3**
1	1.707	3.126	2.782
2	1.707	3.175	2.780
3	1.806	3.212	2.800
4	1.807	3.157	2.859
5	1.814	3.067	2.794
▲h	**0.107**	**0.145**	**0.079**

De la figura 43,44,45 y tabla 26, muestran que los perfiles de calado obtenidos con las mallas no estructuradas presentan una distribución similar en las tres secciones transversales evaluadas. La malla de 1×1, al representar el mayor nivel de refinamiento, constituye la referencia del análisis, observándose que la malla de 2×2 reproduce prácticamente el mismo perfil hidráulico, mientras que las mallas de 3×3, 4×4 y 5×5 presentan ligeras variaciones asociadas al incremento del tamaño de la malla. Asimismo, la variación máxima de cota fue de 0.107 m, 0.145 m y 0.079 m para las secciones 1, 2 y 3, respectivamente, evidenciando que el MDT de 3 m mantiene una representación consistente del perfil hidráulico en las mallas no estructuradas.

En conjunto, las mallas no estructuradas presentan menores variaciones de cota entre las secciones evaluadas que las mallas estructuradas, lo que sugiere una representación más uniforme del perfil hidráulico frente al cambio del tamaño de malla para el MDT de 3 m, bajo las condiciones analizadas.

3.4. Evaluación de tiempo de procesamiento

3.4.1. Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas

El tiempo que demora el modelo computacional en ejecutar una simulación numérica en HEC-RAS desde el inicio hasta obtener los resultados finales se muestra en la siguiente tabla 41.

Tabla 27
Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas

Caudal (m^3/s)	MDT	Tamaño de malla	Código	Tiempo de simulación (h:min:s)	Tiempo en minutos (min)
749	1	1x1	HR1-M1x1	00:59:09	59.15
		2x2	HR1-M2x2	00:11:52	11.87

	3x3	HR1-M3x3	00:05:18	5.30
	4x4	HR1-M4x4	00:03:05	3.08
	5x5	HR1-M5x5	00:02:06	2.10
2	1x1	HR2-M1x1	01:00:37	60.62
	2x2	HR2-M2x2	00:11:36	11.60
	3x3	HR2-M3x3	00:05:09	5.15
	4x4	HR2-M4x4	00:02:59	2.98
	5x5	HR2-M5x5	00:02:05	2.08
3	1x1	HR3-M1x1	00:58:49	58.82
	2x2	HR3-M2x2	00:11:23	11.38
	3x3	HR3-M3x3	00:05:06	5.10
	4x4	HR3-M4x4	00:02:49	2.82
	5x5	HR3-M5x5	00:01:44	1.73
4	1x1	HR4-M1x1	00:58:25	58.42
	2x2	HR4-M2x2	00:11:01	11.02
	3x3	HR4-M3x3	00:04:54	4.90
	4x4	HR4-M4x4	00:02:52	2.87
	5x5	HR4-M5x5	00:01:39	1.65
5	1x1	HR5-M1x1	00:57:31	57.52
	2x2	HR5-M2x2	00:11:07	11.12
	3x3	HR5-M3x3	00:03:51	3.85
	4x4	HR5-M4x4	00:01:55	1.92
	5x5	HR5-M5x5	00:01:09	1.15

Nota. Se muestra el tiempo de procesamiento en mallas estructuradas.

De la tabla 27, los resultados muestran que el tiempo de procesamiento disminuye significativamente al incrementar el tamaño de la malla. Las mallas finas (1×1) presentan los mayores tiempos de simulación, cercanos a 60 minutos, mientras que las mallas más gruesas (5×5) reducen el tiempo a aproximadamente 1–2 minutos. Esto evidencia que el refinamiento de malla incrementa la demanda computacional del modelo, siendo el tamaño de la malla uno de los principales factores que influyen en el tiempo de procesamiento.

3.4.2. Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas

El tiempo que demora el modelo computacional en ejecutar una simulación numérica en IBER desde el inicio hasta obtener los resultados finales se muestra en la siguiente tabla 28.

Tabla 28

Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas

Caudal (m^3/s)	MDT	Tamaño de malla	Código	Tiempo de simulación (h:min:s)	Tiempo en minutos (min)
749	1	1x1	IR1-M1x1	05:42:30	342.50
		2x2	IR1-M2x2	01:09:25	69.42
		3x3	IR1-M3x3	00:28:36	28.60
		4x4	IR1-M4x4	00:16:15	16.25
		5x5	IR1-M5x5	00:10:48	10.80
	2	1x1	IR2-M1x1	05:40:32	340.53
		2x2	IR2-M2x2	01:09:24	69.40
		3x3	IR2-M3x3	00:28:44	28.73
		4x4	IR2-M4x4	00:16:27	16.45
		5x5	IR2-M5x5	00:10:58	10.97
	3	1x1	IR3-M1x1	05:39:43	339.72
		2x2	IR3-M2x2	01:08:32	68.53
		3x3	IR3-M3x3	00:28:37	28.62
		4x4	IR3-M4x4	00:16:19	16.32
		5x5	IR3-M5x5	00:11:04	11.07
	4	1x1	IR4-M1x1	05:44:58	344.97
		2x2	IR4-M2x2	01:09:22	69.37
		3x3	IR4-M3x3	00:29:03	29.05
		4x4	IR4-M4x4	00:16:25	16.42
		5x5	IR4-M5x5	00:10:57	10.95
	5	1x1	IR5-M1x1	05:41:26	341.43
		2x2	IR5-M2x2	01:08:52	68.87
		3x3	IR5-M3x3	00:29:26	29.43
		4x4	IR5-M4x4	00:17:06	17.10
		5x5	IR5-M5x5	00:11:06	11.10

Nota. Se muestra el tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas.

De la tabla 28, los resultados muestran que el tiempo de procesamiento disminuye notablemente al aumentar el tamaño de la malla. Las mallas finas (1×1) presentan los mayores tiempos de simulación, alrededor de 340 minutos, mientras que las mallas más gruesas (5×5) reducen el tiempo a aproximadamente 11 minutos. Esto demuestra que el refinamiento de malla incrementa la demanda computacional, siendo el tamaño de la malla uno de los principales factores que influyen en el tiempo de procesamiento.

3.4.3. Comparación de tiempo de procesamiento IBER HEC-RAS

Para la comparación del tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas, se considera únicamente el MDT de 1 m, debido a que el tiempo

computacional varía principalmente en función del tamaño y cantidad de elementos de la malla, más que de la resolución del MDT.

Tabla 29

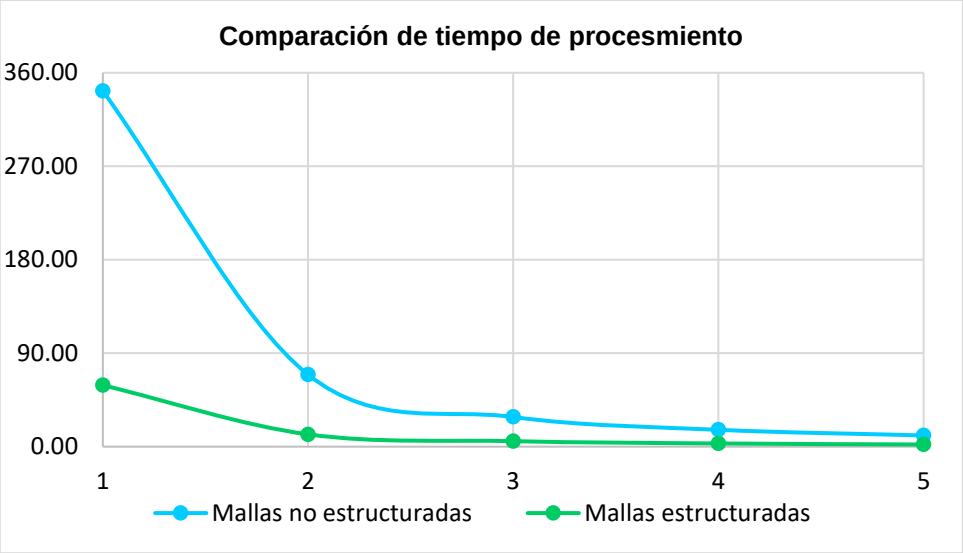
Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas

Tamaño de malla	Tiempo de mallas no estructuradas (min)	Tiempo de mallas estructuradas (min)	Factor de incremento	Porcentaje de incremento
1	342.50	59.15	5.79	479%
2	69.42	11.87	5.85	485%
3	28.60	5.30	5.40	440%
4	16.25	3.08	5.27	427%
5	10.80	2.10	5.14	414%

Nota. Se muestra la variación de tiempo de procesamiento entre la malla estructurada y no estructurada

Figura 46

Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas



Nota. Se muestra la gráfica visual de tiempo entre la malla estructurada y no estructurada

De la tabla 29 y figura 46, la relación de incremento varía un promedio de 5.49 veces, lo que representa aumentos entre 414 % y 485 %. Asimismo, se observa que, a medida que aumenta el tamaño de malla, la diferencia de tiempo entre ambos tipos de malla disminuye ligeramente. Esto evidencia que las mallas no estructuradas demandan un mayor tiempo de procesamiento debido al mayor número de elementos generados y a la complejidad geométrica de la discretización, lo que incrementa el esfuerzo computacional durante la resolución numérica del modelo.

3.5. Evaluación de costo computacional.

Tabla 30

Costo computacional de refinamiento en mallas no estructuradas

Tamaño de malla	Número de elementos	Razón efectiva	Factor de refinamiento	variación de costo computacional
1x1	1,360,887			1.0000
2x2	339,237	4.01		0.1732
3x3	150,461	2.25	2.40	0.0300
4x4	84,364	1.78		0.0052
5x5	53,999	1.56		0.0009

Nota. El costo computacional es incremental según el refinamiento de malla.

Tabla 31

Costo computacional de refinamiento en mallas estructuradas

Tamaño de malla	Número de elementos	Razón efectiva	Factor de refinamiento	variación de costo computacional
1x1	590,739			1.0000
2x2	147,414	4.01		0.1732
3x3	65,383	2.25	2.40	0.0300
4x4	36,711	1.78		0.0052
5x5	23,454	1.57		0.0009

Nota. El costo computacional es incremental según el refinamiento de malla.

La evaluación de la variación del costo computacional en función del refinamiento de la malla se presenta en las Tablas 30 y 31 para las mallas estructuradas y no estructuradas. Los resultados muestran que, al incrementar el tamaño de la malla, disminuyen el número de elementos, la variación del costo computacional y el tiempo de procesamiento. Las mallas de 2×2 reducen aproximadamente un 82.63 % el tiempo de procesamiento respecto a las mallas de 1×1, resultado consistente con lo señalado por Bladé et al. (2014), quienes indican que resoluciones excesivamente finas incrementan la demanda computacional sin generar mejoras proporcionales en los resultados numéricos. En las condiciones del presente estudio, el refinamiento por debajo de 2 m representa una mayor demanda computacional con variaciones reducidas en las variables hidráulicas analizadas.

3.6. Evaluación comparativa de la resolución del MDT.

El análisis de la resolución del MDT se basó en el calado, por ser la principal variable hidráulica en estudios de inundación y presentar un comportamiento de convergencia más consistente que la velocidad.

Tabla 32
Evaluación comparativa de la resolución del MDT.

Resolución MDT	GCI promedio	Relación asintótica promedio	Orden observado (p)	Interpretación
HEC-RAS - Mallas estructuradas				
1 m	1.15%	0.99	1.98	Convergencia adecuada; incertidumbre baja.
2 m	3.68%	0.99	1.01	Convergencia lenta, pero estable.
3 m	1.90%	0.99	1.57	Convergencia adecuada y comportamiento consistente.
4 m	1.00%	1.00	1.96	Mejor estabilidad numérica; comportamiento cercano al esperado.
5 m	0.19%	1.11	4.26	GCI muy bajo, pero p superior al esperado; posible artefacto numérico.
IBER - Mallas no estructuradas				
1 m	7.37%	1.06	-2.235	Convergencia oscilatoria.
2 m	13.23%	1.03	0.585	Convergencia lenta; elevada incertidumbre.
3 m	4.40%	1.02	1.325	Convergencia adecuada y estable.
4 m	1.14%	1.01	2.275	Muy baja incertidumbre; p ligeramente superior al esperado.
5 m	9.26%	1.04	-1.025	Convergencia oscilatoria.

La Tabla 32 resume los indicadores de convergencia numérica para las diferentes resoluciones del MDT en HEC-RAS 2D e IBER. En HEC-RAS los MDT de 1m,3 m y 4 m presentan un comportamiento consistente, con valores bajos de GCI, relaciones de convergencia asintótica próximas a la unidad y órdenes observados acordes con el comportamiento esperado. En IBER, el MDT de 3 m muestra el comportamiento más consistente al integrar los tres indicadores, mientras que los MDT de 1 m y 5 m presentan convergencia oscilatoria y el MDT de 2 m evidencia una convergencia más lenta. En conjunto, el MDT de 3 m presenta un equilibrio favorable entre la incertidumbre

por discretización, la proximidad al régimen asintótico y la estabilidad del orden observado de convergencia para las condiciones del presente estudio.

Los resultados concuerdan con lo reportado por Huxley et al. (2022) quienes identificaron la existencia de una resolución intermedia en la que los modelos hidráulicos alcanzan una adecuada estabilidad numérica y una relativa independencia de malla, sin demandar costos computacionales excesivos. En el caso del valle Antacucho, los análisis de convergencia sugieren que las resoluciones intermedias permiten mantener resultados hidráulicos consistentes, reduciendo simultáneamente el esfuerzo computacional respecto a las mallas más finas.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1) La resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y el tamaño de malla influyen en el comportamiento de las simulaciones bidimensionales de inundación realizadas mediante HEC-RAS 2D e IBER. Las variaciones en la resolución del MDT modifican la representación del relieve y las variables hidráulicas simuladas, mientras que el tamaño de malla influye principalmente en la estabilidad numérica y en la demanda computacional. Los resultados obtenidos evidencian que la influencia de estos parámetros depende del modelo hidráulico utilizado y de las condiciones geomorfológicas del área de estudio.
2) Se desarrollaron satisfactoriamente los modelos hidráulicos bidimensionales en HEC-RAS 2D e IBER utilizando cinco resoluciones del MDT (1m, 2m, 3m, 4m y 5 m) y cinco tamaños de malla (1×1, 2×2, 3×3, 4×4 y 5×5) metros, permitiendo analizar la influencia de estos parámetros sobre el comportamiento hidráulico y numérico de las simulaciones. Los resultados evidenciaron que la resolución del MDT influye en la representación de la topografía y de las variables hidráulicas, mientras que el tamaño de malla condiciona el nivel de discretización espacial empleado por cada modelo.
3) La comparación y evaluación de las características hidráulicas demostraron que el calado máximo y el área inundada presentaron un comportamiento más estable a los cambios de resolución del MDT y tamaño de malla, mientras que la velocidad máxima es más sensible al refinamiento de la discretización. Se cuantificó que las mallas no estructuradas (IBER) demanda un promedio de 5.49 veces más tiempo que las mallas estructuradas (HEC-RAS). Se verificó además que el tiempo de procesamiento depende principalmente del tamaño de malla y no de la resolución del MDT.
4) La evaluación integrada de la convergencia numérica, las variables hidráulicas y la eficiencia computacional evidenció que el MDT de 3 m presentó un comportamiento consistente en ambos modelos hidráulicos. Asimismo, la malla de 2×2 m redujo el tiempo de procesamiento en 82.63 % respecto a la malla de 1×1 m, sin variaciones significativas en las variables hidráulicas. Para las condiciones del valle Antacucho, el MDT de 3 m, la malla de 2×2 m y las mallas no estructuradas (IBER) representaron un equilibrio favorable entre la

consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

4.2. Recomendaciones

- Utilizar resoluciones intermedias del Modelo Digital del Terreno (MDT) al trabajarse con datos topográficos de alta resolución, en modelamientos hidráulicos bidimensionales, debido a que permiten obtener resultados hidráulicos estables y confiables.
- Emplear la malla intermedia (malla 2x2) tanto en mallas estructuradas como no estructuradas, ya que presentó adecuada convergencia numérica y un mejor equilibrio entre precisión hidráulica y eficiencia computacional.
- Considerar el uso de mallas no estructuradas en zonas con geometrías complejas o variaciones topográficas pronunciadas y para estudios de defensas ribereñas, debido a que presentan mejor adaptación espacial y mayor estabilidad en parámetros sensibles como la velocidad.
- Incorporar análisis de convergencia numérica mediante el índice GCI y relaciones de convergencia en futuros estudios hidráulicos, con la finalidad de verificar la independencia de malla y garantizar mayor confiabilidad en los resultados simulados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abily, M., Delestre, O., Gourbesville, P., Bertrand, N., Duluc, C.-M., & Richet, Y. (2016). Global sensitivity analysis with 2D hydraulic codes: Application on uncertainties related to high-resolution topographic data. *Springer Water*, 301–315. https://doi.org/10.1007/978-981-287-615-7_21

Agisoft LLC. (2024). *Agisoft Metashape user manual professional edition (version 2.3)*. https://www.agisoft.com

Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thieken, A. H. (2009). Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, *49*(1), 79–98. https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-008-9277-8

Ashgriz, N., & Mostaghimi, J. (2001). *An introduction to computational fluid dynamics*.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, *30*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/J.RIMNI.2012.07.004

Canchari, L. (2023). *Análisis comparativo del modelamiento hidráulico utilizando IBER y HEC-RAS para determinar áreas inundables en la Quebrada del Diablo, Región Tacna*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4375

Castedo, R., Reifarth, C., Santos, A. P., Losada, J., López, L. M., Chiquito, M., & Mancilla, J. M. (2019). Application of grid convergence index to shock wave validated with LS-DYNA and ProsAir. *Ingeniería e Investigación*, *39*(3), 20–26. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092019000300020&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Chaudhry, M. H. (2008). Open-channel flow: Second Edition. *Open-Channel Flow: Second Edition*, 1–523. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68648-6/SAVE-RESEARCH

Chavez, H. (2024). *Instructivo de prácticas de laboratorio de modelación numérica para analizar la hidrodinámica de cauces naturales: Instructivo de prácticas de laboratorio de modelación numérica para analizar la hidrodinámica de cauces naturales en dos dimensiones mediante el programa IBER*.

Chow, V. T. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*.

Chow, V. T., & Maidment, D. R. (1998). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.

Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, *377*(1–2), 131–142. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.015

Fernández, J. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos : introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. https://books.google.com/books/about/T%C3%A9cnicas_num%C3%A9ricas_en_ingenier%C3%ADa_de_f.html?hl=es&id=-WGXtgAACAAJ

Fernández, L. A. (2016). *Comportamiento bidimensional para determinar mancha de inundación de la cuenca río Cachi - Sectores de Laramate Santiago de Pischa - Huamanga - Ayacucho* [Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3720

GEASIG. (2018). *IBER Y ARCGIS Modelización hidráulica bidimensional*.

Gomes, E., & Garcia, C. (2012). A finite element method based on capturing operator applied to wave propagation modeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *201–204*, 127–138. https://doi.org/10.1016/J.CMA.2011.10.006

Hernández, R., Fernádez, C., & Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación. *Metodología de La Investigación*, 1–634. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008&info=resumen&idioma=SPA

Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, *253*(1–4), 239–249. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00490-5

Huxley, C., Syme, B., Ryan, P., & Collecutt, G. (2022). *Hydraulic Modelling 2D Cell Size Result Convergence-Comparing the Performance of Different Shallow Water Equation Solution Schemes*.

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2004). Digital terrain modeling: Principles and methodology. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, 1–320. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203357132/digital-terrain-modeling-zhilin-li-christopher-zhu-chris-gold

Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación.

Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. https://doi.org/10.35622/INUDI.B.080

Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J. (2008). GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling and Software*, *23*(10–11), 1300–1311.

Morales, J., Pérez, J., & Delgado, F. (2018). *Comparación de modelos numéricos HEC-RAS e Iber en la modelación de inundaciones urbanas*. 105–117.

Orellana, R. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS*.

Roache, P. J. (1998). *Funadamentals of verification and validation*.

Schumann, G., Matgen, P., Hoffmann, L., Hostache, R., Pappenberger, F., & Pfister, L. (2007). Deriving distributed roughness values from satellite radar data for flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, *344*(1–2), 96–111. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2007.06.024

Sierra, H. (2018). *Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del rio Pativilca, en flujo no permanente* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. https://hdl.handle.net/20.500.12996/3545

Smith, K., & Ward, R. (1998). Floods: Physical processes and human impacts. *Book*, 394. https://www.wiley.com/en-us/Floods%3A+Physical+Processes+and+Human+Impacts-p-9780471952480

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, *90*, 201–216. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815216310040

Torres, C. A. B. (2010). Metodologia de la investigación para administración, economía, humanidades y ciencias sociales. In *Pautas para la redacción de manuscritos según el manual APA*. Pearson Prentice Hall. https://pure.unisabana.edu.co/es/publications/metodologia-de-la-investigaci%C3%B3n-para-administraci%C3%B3n-econom%C3%ADa-huma/

U.S. Army Corps of Engineers. (2025). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual* (Hydrologic Engineering Center, Ed.).

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.*

Xaman, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. https://books.google.com/books/about/Din%C3%A1mica_De_Fluidos_Computacional_Para.html?hl=es&id=dwIDDAAAQBAJ

Zapata Escudero, J. S. (2022). *Mapas de peligro por inundación del río Chibunga en el tramo de influencia al Parque Lineal ubicado en la ciudad de Riobamba: modelación hidrodinámica bidimensional del río Chibunga, en el tramo de influencia al parque lineal ubicado en la ciudad de Riob*…. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23010

ACRÓNIMOS

MDT **:** *Modelo digital del terreno.*

HEC – RAS **:** Hydrologic Engineering Center – River Analysis System.

RTK **:** Real-Time Kinematic (Cinemática en Tiempo Real).

GCI **:** Grid Convergence Index (Índice de Convergencia de Malla).

2D : *Bidimensional.*

SIG : *Sistema de información geográfica.*

IBER : *Modelo hidráulico bidimensional IBER.*

CFD : *Dinámica de fluidos computacional.*

CPU : *Central Processing Unit (Unidad central de procesamiento).*

TIN : *Triangulated Irregular Network (Red irregular triangulada).*

LiDAR : *Light Detection and Ranging (Detección y medición por luz).*

GLOSARIO

Área inundada : Superficie cubierta por agua durante un evento hidráulico simulado.

Calado hidráulico : Altura o profundidad del agua medida desde el fondo del cauce hasta la superficie libre.

Convergencia numérica : Proceso mediante el cual los resultados de una simulación tienden a estabilizarse al refinar la malla computacional.

Costo computacional : Cantidad de recursos y tiempo requeridos para ejecutar una simulación numérica.

Discretización espacial : División del dominio hidráulico en elementos o celdas para resolver numéricamente el flujo.

Flujo bidimensional : Movimiento del agua representado en dos direcciones horizontales dentro de un modelo hidráulico.

GCI : Índice utilizado para evaluar el error numérico y la independencia de malla en simulaciones computacionales.

Independencia de malla : Condición en la que el refinamiento adicional de la malla produce cambios mínimos en los resultados simulados.

Malla estructurada : Discretización compuesta por elementos organizados regularmente, generalmente de forma cuadrada o rectangular.

Malla no estructurada : Discretización formada por elementos irregulares adaptables a geometrías complejas del terreno.

Modelo hidráulico bidimensional : Herramienta numérica utilizada para simular el comportamiento del flujo de agua en dos dimensiones.

Modelo Digital del Terreno (MDT) : Representación digital de la superficie del terreno sin considerar objetos superficiales.

Orden aparente de convergencia : Parámetro que indica la velocidad con la que una solución numérica converge hacia la solución exacta.

Relación de convergencia **:** Indicador utilizado para verificar si una solución numérica se encuentra dentro de la región asintótica de convergencia.

Resolución del MDT **:** Tamaño de celda o nivel de detalle espacial del Modelo Digital del Terreno.

Simulación hidráulica **:** Proceso numérico que reproduce el comportamiento del flujo de agua en un sistema hidráulico.

Solución asintótica **:** Valor extrapolado al que tiende una solución numérica cuando la malla se refina progresivamente.

Tiempo de procesamiento **:** Tiempo requerido por el software para ejecutar una simulación hidráulica.

Velocidad del flujo **:** Rapidez con la que el agua se desplaza en un modelo hidráulico.

ANEXOS:

ANEXO A
PANEL FOTOGRÁFICO

Figura N° 1: Vista Aérea del valle Antacucho.



Figura N° 2: Vista de la estación de la base del equipo de GPS diferencial.



Figura N° 3: Vista de la toma de puntos de referencia con el Rover del equipo GPS diferencial.



Figura N° 4: Puntos de control en campo**.**



Figura N° 5: Vista aérea del vuelo con el dron EVO II PRO RTK



Figura N° 6: Vista del valle de Antacucho después de un evento de máximas avenidas.



Figura N° 7: Vista de la huella hídrica y casas afectadas en un evento de máxima avenida en el valle Antacucho.



Figura N° 8: Vista de los daños y vías de acceso afectadas por un evento de máxima avenida.



ANEXO B

PLANOS

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta etapa importante de mi vida.

A mi madre Victoria, por cuidarme y protegerme cuando aún no podía hacerlo por mí mismo, y por seguir acompañándome y guiándome desde el otro lado de la vida hasta el día de hoy.

A mis abuelitos Valentín y Lucía, por su cariño, consejos y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi madre Juana, por darme la vida y brindarme siempre su esfuerzo y dedicación.

Y a todos mis amigos y familiares, por concederme el honor de formar parte de sus vidas y por motivarme en los momentos más difíciles, impulsándome a superar cada obstáculo hasta alcanzar este logro académico.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente, contribuyendo al desarrollo de mis conocimientos y capacidades.

Expreso mi especial agradecimiento a mi asesor de tesis, M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán, por su constante orientación, apoyo y asesoramiento durante el desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, agradezco a los miembros del jurado de tesis: Ph.D. Sandra Del Águila Ríos, Ing. Efraín Chuchón Prado y Dr. Eleazar Chuchón Angulo, por sus valiosos comentarios, observaciones y aportes académicos que contribuyeron al fortalecimiento de la presente tesis.

Mi profundo agradecimiento a mi familia y seres queridos, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación permanente en los momentos más difíciles, impulsándome a seguir adelante hasta alcanzar este logro académico.

Finalmente, agradezco a mis amigos Rómulo, Juan, Mayumi, Victor y compañeros de aula que contribuyeron y me acompañaron durante esta etapa de mi formación profesional.

RESUMEN

El modelamiento hidráulico bidimensional constituye una herramienta fundamental para la evaluación de inundaciones, cuya confiabilidad depende, entre otros factores, de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de la malla computacional. La presente investigación tuvo como objetivo analizar la influencia de la resolución del MDT y del tamaño de malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER en el valle Antacucho – Ayacucho. La metodología consistió en desarrollar modelos hidráulicos utilizando cinco resoluciones del MDT y cinco tamaños de malla, generando un total de 50 simulaciones. La evaluación se realizó mediante el Índice de Convergencia de Malla (GCI), el orden de convergencia, la relación de convergencia asintótica y las variables hidráulicas profundidad máxima, velocidad máxima y área inundada, además del tiempo de procesamiento y el costo computacional. Los resultados evidenciaron que, en HEC-RAS, los MDT de 1,3 y 4 m presentaron una convergencia más cercana al régimen asintótico, mientras que el MDT de 5 m mostró comportamiento oscilatorio y menor consistencia numérica. En IBER, el MDT de 3 m presentó una convergencia más consistente y mejor adaptación a la geometría del terreno. Asimismo, la profundidad y el área inundada mostraron un comportamiento más consistente que la velocidad máxima, la cual resultó ser la variable más sensible a la discretización espacial. Las simulaciones en IBER demandaron, en promedio, 5,49 veces más tiempo de procesamiento que HEC-RAS, mientras que aumentar el tamaño de malla de 1×1 m a 2×2 m redujo el tiempo de procesamiento en 82,63 %, sin afectar significativamente la consistencia de los resultados. Se concluye que un MDT de 3 m y una malla de 2×2 m ofrecen el mejor equilibrio entre estabilidad numérica, representación hidráulica y eficiencia computacional para la modelación bidimensional de inundaciones en el valle de Antacucho.

Palabras clave: Modelamiento hidráulico bidimensional; Modelo Digital del Terreno (MDT); Mallas estructuradas; Mallas no estructuradas; Convergencia numérica; Estabilidad numérica; Eficiencia computacional; HEC-RAS; IBER.

ABSTRACT

Two-dimensional hydraulic modeling is a fundamental tool for flood assessment; its reliability depends on factors such as the resolution of the Digital Terrain Model (DTM) and the size of the computational mesh. This study aimed to analyze the influence of DTM resolution and mesh size on 2D flood simulations using HEC-RAS 2D and IBER in the Antacucho valley (Ayacucho). The methodology involved developing hydraulic models using five DTM resolutions and five mesh sizes, resulting in a total of 50 simulations. Evaluation was based on the Grid Convergence Index (GCI), order of convergence, asymptotic convergence ratio, and hydraulic variables—specifically maximum depth, maximum velocity, and flooded area—alongside processing time and computational cost. Results showed that in HEC-RAS, 1 m, 3 m, and 4 m DTMs exhibited convergence closer to the asymptotic regime, whereas the 5 m DTM displayed oscillatory behavior and lower numerical consistency. In IBER, the 3 m DTM demonstrated more consistent convergence and better adaptation to the terrain geometry. Furthermore, depth and flooded area showed more consistent behavior than maximum velocity, which proved to be the variable most sensitive to spatial discretization. On average, IBER simulations required 5.49 times more processing time than HEC-RAS, while increasing the mesh size from 1×1 m to 2×2 m reduced processing time by 82.63% without significantly affecting result consistency. It is concluded that a 3 m DTM and a 2×2 m mesh offer the best balance between numerical stability, hydraulic representation, and computational efficiency for 2D flood modeling in the Antacucho valley.

Keywords: Two-dimensional hydraulic modeling; Digital Terrain Model (DTM); Structured meshes; Unstructured meshes; Numerical convergence; Numerical stability; Computational efficiency; HEC-RAS; IBER.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA ii
AGRADECIMIENTO iii
RESUMEN iv
ABSTRACT v
ÍNDICE GENERAL vi
ÍNDICE DE FIGURAS x
ÍNDICE DE TABLAS xii
INTRODUCCIÓN 1
OBJETIVOS 2
OBJETIVO GENERAL 2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2
CAPITULO I 3
MARCO TEÓRICO 3
1.1. ANTECEDENTES 3
1.1.1. A nivel mundial 3
1.1.2. A nivel nacional, regional y local 4
1.2. BASES TEÓRICAS 4
1.2.1. Modelo digital de terreno (MDT) 4
1.2.1.1. Influencia de la resolución del MDT en la simulación hidráulica bidimensional 5
1.2.2. Máximas avenidas 6
1.2.2.1. Importancia de las máximas avenidas. 6
1.2.3. Rugosidad 6
1.2.4. Modelación de inundaciones bidimensional (2D) 8
1.2.5. Dinámica de fluidos computacional. 9
1.2.6. Ecuación de Saint-Venant 2D 9
1.2.7. Métodos numéricos y estructuras de malla en modelación hidráulica 11
1.2.7.1. Métodos numéricos 11

1.6.2.2. Discretización Espacial 12
1.2.8. Número de Courant....14
1.2.9. Método del índice de convergencia de malla (GCI) 15
1.2.10. Costos incrementales de convergencia de malla. 16
CAPITULO II 18
MATERIALES Y METODOLOGÍA....18
2.1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO 18
2.1.1. Zona de estudio 18
2.1.2. Ubicación política....19
2.1.3. Ubicación geográfica....19
2.1.4. Limites 19
2.1.5. Accesibilidad....22
2.1.6. Clima de la zona de estudio 22
2.1.7. Topografía de la zona de estudio: 22
2.1.8. Uso de suelo....23
2.2. MATERIALES Y EQUIPOS....24
2.2.1. Materiales y equipos en campo....24
2.2.2. Materiales y equipos en oficina 25
2.2.3. Programa de ingeniería....25
2.3. METODOLOGÍA 25
2.3.1. Método de investigación....25
2.3.2. Tipo de investigación 26
2.3.3. Nivel de investigación 26
2.3.4. Diseño de investigación 26
2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS 26
2.4.1. Técnicas 26
2.4.2. Instrumentos 27
2.5. LA POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO DE PROYECTO 27
2.5.1. Población 27

2.5.2. Muestra 27
2.6. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN 27
2.6.1. MDT (Modelo digital del terreno) 27
2.6.1.1. Planificación del levantamiento aerofotogramétrico 27
2.6.1.2. Trabajo de campo en el levantamiento Aero fotogramétrico 28
2.6.1.3. Puntos de control 29
2.6.1.4. Procesamiento del MDT en Agisoft Metashape 30
2.6.1.5. Exportación de resultados 31
2.6.2. Datos hidrológicos de caudal máximo 31
2.6.3. Rugosidad en el rio Cachi. 32
2.6.4. Modelamiento Hidráulico en HEC-RAS 33
2.6.4.1. Plan de simulaciones a realizarse 33
2.6.4.2. Diagrama de metodología 35
2.6.4.3. Preproceso 37
2.6.4.4. Proceso 38
2.6.4.5. Post-proceso 41
2.6.5. Modelamiento hidráulico bidimensional en IBER. 42
2.6.5.1. Plan de simulaciones a realizarse 42
2.6.5.2. Diagrama de metodología 44
2.6.5.3. Preproceso 46
2.6.5.4. Proceso 48
2.6.5.5. Post-proceso 52
2.6.6. Análisis de convergencia de malla 52
2.6.7. Análisis de costos incrementales computacionales 53
CAPITULO III 54
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 54
3.1. Elaboración de modelos hidráulicos 54
3.1.1. Malla estructurada en HEC-RAS 54
3.1.2. Malla no estructurada en IBER. 54

3.2. Resultados Hidráulicos de las simulaciones 57
3.2.1. Resultados de mallas estructuradas - HEC-RAS 57
3.2.2. Resultados de mallas no estructuradas – IBER 60
3.3. Evaluación de las características hidráulicas. 63
3.3.1. Análisis de convergencia del modelo en calado 63
3.3.2. Análisis de convergencia del modelo en velocidad 66
3.3.3. Análisis de convergencia del modelo en área de inundación. 69
3.3.4. Análisis comparativo de secciones transversales. 72
3.4. Evaluación de tiempo de procesamiento 77
3.4.1. Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas 77
3.4.2. Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas 78
3.4.3. Comparación de tiempo de procesamiento IBER HEC-RAS 79
3.5. Evaluación de costo computacional. 81
3.6. Evaluación comparativa de la resolución del MDT. 82
CAPITULO IV 84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 84
4.1. Conclusiones 84
4.2. Recomendaciones 85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86
ACRÓNIMOS 90
GLOSARIO 91
ANEXOS: 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Discretización de un dominio* 12
Figura 2 *Malla estructurada* 13
Figura 3 *Esquema de malla no estructurada* 14
Figura 4 *Vista principal de la zona de estudio* 18
Figura 5 *Mapa departamental del proyecto* 20
Figura 6 *Mapa provincial del proyecto* 20
Figura 7 *Mapa distrital del proyecto* 21
Figura 8 *Zona de intervención de la tesis* 21
Figura 9 *Topografía de la zona de estudio vista aérea.* 23
Figura 10 *Modelo Digital de Terreno (MDT)* 23
Figura 11 *Cobertura vegetal de la zona de estudio* 24
Figura 12 *Planificación del vuelo en el valle de Antacucho* 28
Figura 13 *Vista aérea del valle Antacucho.* 29
Figura 14 *Puntos de control dejados en el terreno* 29
Figura 15 *Caudal máximo por TR para la cuenca Cachi.* 32
Figura 16 *Valores de coeficiente de rugosidad (n)* 33
Figura 17 *Diagrama de metodología para mallas estructuradas* 36
Figura 18 *Usos de suelo asignado en HEC-RAS* 38
Figura 19 *Interfaz de análisis de flujo no permanente* 39
Figura 20 *Ecuación de cómputo en HEC-RAS* 40
Figura 21 *Ajuste de número de Courant en HEC-RAS* 40
Figura 22 *Herramienta de "Unsteady Flow Analysis"* 41
Figura 23 *Visualización de resultados en HEC-RAS* 42
Figura 24 *Diagrama de metodología para mallas no estructuradas* 45
Figura 25 *Geometría del área de estudio* 46
Figura 26 *Usos de suelo asignado en IBER* 48
Figura 27 *Esquema Numérico Seleccionado* 49
Figura 28 *Parámetros de Tiempo en IBER* 50
Figura 29 *Parámetros Generales en IBER* 51
Figura 30 *Proceso de simulación en IBER* 51
Figura 31 *Post-proceso en IBER* 52
Figura 32 *Malla estructurada* 54
Figura 33 *Malla no estructurada 1x1* 55
Figura 34 *Malla no estructurada 3x3* 56
Figura 35 *Malla no estructurada 5x5* 56

Figura 36 *Relación de convergencia asintótica de mallas de calado máximo*.....65
Figura 37 *Relación de convergencia asintótica de mallas de Velocidad máxima*.....68
Figura 38 *Relación de convergencia asintótica de mallas de Área inundada*.....72
Figura 39 *Seccionamiento del modelo*.....73
Figura 40 *Sección transversal 1 en malla estructurada* 73
Figura 41 *Sección transversal 2 en malla estructurada* 74
Figura 42 *Sección transversal 3 en malla estructurada* 74
Figura 43 *Sección transversal 1 en malla no estructurada* 75
Figura 44 *Sección transversal 2 en malla no estructurada* 76
Figura 45 *Sección transversal 3 en malla no estructurada* 76
Figura 46 *Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas*...80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Valores del coeficiente de rugosidad (n)* 6
Tabla 2 *Límite del distrito de San José de Ticllas* 19
Tabla 3 *Vías de acceso para llegar hacia la zona de estudio* 22
Tabla 4 *Puntos de control tomadas en campo* 30
Tabla 5 *Parámetros de Procesamiento* 31
Tabla 6 *Modelo digital de terreno (MDT)* 31
Tabla 7 *Plan de simulaciones con mallas estructuradas* 34
Tabla 8 *Tamaño de malla y número de elementos de mallas estructuradas* 37
Tabla 9 *Características de la computadora* 39
Tabla 10 *Plan de simulaciones con mallas no estructuradas* 43
Tabla 11 *Tamaño de malla y número de elementos* 47
Tabla 12 *Características de la computadora* 49
Tabla 13 *Resultados de calado en mallas estructuradas* 57
Tabla 14 *Resultados de velocidad en mallas estructuradas* 58
Tabla 15 *Resultados de área inundada en mallas estructuradas* 59
Tabla 16 *Resultados de calado en mallas no estructuradas* 60
Tabla 17 *Resultados de velocidad en mallas no estructuradas* 61
Tabla 18 *Resultados de área inundada en mallas no estructuradas* 62
Tabla 19 *Índice de convergencia de mallas de calado en mallas estructuradas* 63
Tabla 20 *Índice de convergencia de mallas del calado en mallas no estructuradas* 64
Tabla 21 *Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas estructuradas* 66
Tabla 22 *Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas no estructuradas* ..67
Tabla 23 *Índice de convergencia de mallas de área en mallas estructuradas* 69
Tabla 24 *Índice de convergencia de mallas de área en mallas no estructuradas* 70
Tabla 25 *Variación de cota en mallas estructuradas* 75
Tabla 26 *Variación de cota en mallas no estructuradas* 77
Tabla 27 *Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas* 77
Tabla 28 *Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas* 79
Tabla 29 *Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas* 80
Tabla 30 *Costo computacional de refinamiento en mallas no estructuradas* 81
Tabla 31 *Costo computacional de refinamiento en mallas estructuradas* 81
Tabla 32 Evaluación comparativa de la resolución del MDT. 82

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los eventos de inundación han generado significativos impactos sociales, económicos y ambientales, especialmente en zonas vulnerables como los valles interandinos del Perú. La modelación hidráulica se ha consolidado como una herramienta fundamental para la prevención y gestión de riesgos de inundación, permitiendo simular escenarios de flujo y estimar áreas potencialmente afectadas bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más recurrentes y de mayores consecuencias a nivel mundial, afectando vidas humanas, infraestructura, producción agrícola y el equilibrio ambiental (Smith & Ward, 1998). En zonas como el valle Antacucho – Ayacucho, caracterizado por su topografía montañosa y su alta variabilidad climática, los eventos de inundación representan un riesgo latente, especialmente en periodos de lluvias intensas y crecidas súbitas.

La confiabilidad de las simulaciones hidráulicas bidimensionales depende de la resolución del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del tamaño de la malla computacional, ya que ambos influyen en la representación de la topografía y en variables como la profundidad, la velocidad del flujo, la extensión de la inundación y el tiempo de procesamiento. Los modelos HEC-RAS 2D e IBER permiten desarrollar estas simulaciones mediante mallas estructuradas y no estructuradas, por lo que resulta necesario evaluar la influencia de estas configuraciones en los resultados hidráulicos y en la eficiencia computacional, especialmente en cuencas con relieve complejo como el valle Antacucho.

Frente a esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del tamaño de la malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER, utilizando mallas estructuradas y no estructuradas, respectivamente, en el valle Antacucho – Ayacucho. Para ello, se evaluarán parámetros hidráulicos como la profundidad máxima, la velocidad máxima, el área inundada y el tiempo de procesamiento, considerando diferentes resoluciones del MDT y tamaños de malla. Los resultados permitirán establecer criterios técnicos sobre la influencia de estas variables en el comportamiento de los modelos hidráulicos y en su eficiencia computacional, contribuyendo a la selección de configuraciones adecuadas para estudios de inundación en zonas con características similares.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER, en el valle Antacucho – Ayacucho, 2025.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Elaborar y simular modelos hidráulicos a diferentes resoluciones del modelo digital de terreno (MDT) haciendo el uso de las mallas estructuradas (HEC -RAS) y mallas no estructuradas (IBER).
2) Comparar y evaluar las características hidráulicas y el tiempo de procesamiento por cada modelo hidráulico elaborado a distintas resoluciones del modelo digital de elevaciones (MDT).
3) Identificar la resolución del MDT, el tamaño de malla y el modelo hidráulico que presenten el mejor equilibrio entre la consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. A nivel mundial

Morales et al. (2018) compararon los resultados de simulaciones de inundación en zonas urbanas usando HEC-RAS e IBER, encontrando diferencias en la extensión de las áreas inundadas y en los valores de velocidad y profundidad, atribuibles en gran parte al tratamiento de la geometría del terreno y la forma de discretización de las mallas.

Según Horritt & Bates (2001), la resolución espacial del MDT tiene un impacto significativo en la estimación del área inundada y los tirantes de agua, especialmente en terrenos planos o con relieves suaves, donde pequeñas diferencias en elevación pueden alterar los patrones de flujo.

Por su parte, Bladé et al. (2014) estudiaron el efecto de diferentes resoluciones topográficas en IBER, observando que resoluciones demasiado bajas tienden a subestimar los niveles de agua y la extensión de inundación, mientras que resoluciones excesivamente altas no necesariamente aportan mejoras significativas después de cierto umbral, pero sí incrementan el costo de procesamiento.

Huxley et al. (2022) realizaron una investigación sobre la convergencia del tamaño de celda en modelos hidráulicos bidimensionales, evaluando diferentes resoluciones de malla y su influencia en los resultados hidráulicos. Los autores concluyeron que el refinamiento de malla mejora la precisión de los resultados; sin embargo, incrementa significativamente el costo computacional. Además, demostraron que existe una resolución intermedia donde los resultados alcanzan estabilidad numérica sin necesidad de continuar refinando la discretización espacial.

Abily et al. (2016) analizaron la influencia de la resolución espacial del Modelo Digital de Elevación (DEM) en modelos hidráulicos bidimensionales mediante un análisis global de sensibilidad. Los autores concluyeron que la resolución de discretización espacial constituye uno de los factores con mayor influencia en la variabilidad de los resultados hidráulicos, afectando directamente la representación de inundaciones y el tiempo computacional.

1.1.2. A nivel nacional, regional y local

Orellana (2021) desarrolló una investigación orientada al análisis de inundaciones en la ciudad de Piura mediante la integración de modelos hidrológicos e hidráulicos empleando HEC-HMS y HEC-RAS. El estudio permitió determinar áreas susceptibles a inundación y evaluar el comportamiento hidráulico del flujo ante eventos extremos, demostrando la importancia del modelamiento numérico para la gestión del riesgo de inundaciones.

Sierra (2018) desarrolló un modelamiento hidráulico bidimensional en flujo no permanente del río Pativilca utilizando herramientas numéricas para analizar la dinámica hidráulica y la propagación de inundaciones. Los resultados evidenciaron la utilidad de los modelos bidimensionales para representar con mayor precisión la distribución espacial del flujo.

Canchari (2023)realizó una comparación entre IBER y HEC-RAS para determinar áreas inundables. El estudio concluyó que ambos modelos permiten representar adecuadamente las zonas de inundación; sin embargo, presentan diferencias en la representación hidráulica y en la respuesta numérica de los parámetros simulados.

Fernández (2016) desarrolló una investigación sobre el comportamiento bidimensional del río Cachi en los sectores de Laramate y Santiago de Pischa. El estudio empleó modelación hidrológica e hidráulica para estimar caudales de diseño y determinar manchas de inundación para diferentes periodos de retorno, evidenciando la importancia del modelamiento bidimensional para la evaluación de riesgos de inundación.

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. Modelo digital de terreno (MDT)

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una representación digital tridimensional de la superficie terrestre desnuda, es decir, del relieve natural del suelo sin incluir objetos sobre él como vegetación, edificaciones o infraestructuras (Li et al., 2004)

Cada punto del MDT está definido por sus coordenadas horizontales (X, Y) y una cota o elevación (Z) referida a un datum vertical. Se genera a partir de datos obtenidos por sensores remotos como LIDAR, fotogrametría aérea, imágenes satelitales o mediciones de campo.

1.2.1.1. Influencia de la resolución del MDT en la simulación hidráulica bidimensional.

El Modelo Digital del Terreno (MDT) constituye la principal fuente de información topográfica utilizada en los modelos hidráulicos bidimensionales, ya que define la elevación del terreno sobre la cual se resuelven las ecuaciones de aguas someras. En consecuencia, la resolución espacial del MDT influye directamente en la representación de la superficie del terreno y, por tanto, en la precisión de los resultados hidráulicos obtenidos (Cook & Merwade, 2009).

Las modificaciones en la representación topográfica generan cambios directos en los principales parámetros hidráulicos obtenidos mediante los modelos numéricos. En este contexto el calado puede variar debido a las diferencias en la elevación del terreno; la velocidad del flujo se ve afectada por las alteraciones en la pendiente hidráulica y en la configuración geométrica del cauce; mientras que la extensión de la inundación depende de la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente las trayectorias de propagación del flujo y las áreas de almacenamiento superficial del agua.

Según Cook & Merwade (2009) el desarrollo de los sistemas de información geográfica, la fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), la tecnología LiDAR y el incremento de la capacidad computacional han favorecido la utilización de modelos bidimensionales de alta resolución. La disponibilidad de Modelos Digitales del Terreno (MDT) con resoluciones métricas o submétricas permite representar con mayor detalle la topografía del terreno, mejorando la caracterización de los gradientes hidráulicos y de la conectividad entre el cauce principal y las planicies de inundación

Su precisión depende directamente de la resolución espacial: mientras más fina sea la resolución (por ejemplo, 1 m), mayor nivel de detalle topográfico es capturado (Schumann et al., 2007).

Según Merwade et al. (2008) resoluciones inadecuadas pueden generar errores acumulativos en la simulación de la extensión de inundación, en especial en regiones con alta variabilidad topográfica.

1.2.2. Máximas avenidas

Las máximas avenidas (también conocidas como crecidas máximas o caudales máximos) son los mayores caudales que puede generar una cuenca hidrográfica durante un evento hidrometeorológico extremo. Estas avenidas pueden ser resultado de lluvias intensas, deshielos rápidos, rupturas de embalses, o combinaciones de varios factores.

Según Chow & Maidment (1998) El mayor caudal instantáneo o medio que se espera ocurra durante un periodo dado, asociado a un determinado período de retorno.

1.2.2.1. Importancia de las máximas avenidas.

El cálculo de las máximas avenidas es fundamental para:

- Diseño de presas, vertederos, canales y puentes.
- Planificación de defensas ribereñas y estructuras de protección contra inundaciones.
- Zonificación de áreas de riesgo.
- Evaluación de seguridad de infraestructuras existentes.
- Modelación hidráulica de inundaciones.

1.2.3. Rugosidad

La rugosidad en cauces naturales corresponde a la oposición que generan el lecho y las orillas del río al paso del agua, debido a elementos como piedras, gravas, vegetación, sedimentos e irregularidades presentes en el cauce. Este factor tiene una influencia importante en la velocidad, profundidad y comportamiento del flujo hidráulico, y generalmente se expresa mediante el coeficiente de Manning (n).

La rugosidad en canales naturales depende de las irregularidades superficiales, vegetación, alineamiento del cauce y obstrucciones presentes en el flujo (Chow, 1994).

Tabla 1

Valores del coeficiente de rugosidad (n)

Tipo de canal y descripción	mínimo	normal	máximo
D. Corrientes naturales			
D-1 Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente <100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033

2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080

4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (>100 pies)			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025		0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

Nota. Se muestra los coeficientes de rugosidad para corrientes naturales (Chow, 1994).

1.2.4. Modelación de inundaciones bidimensional (2D)

Los modelos 2D de inundación resuelven las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, considerando la variabilidad del flujo en todas las direcciones (Teng et al., 2017). A diferencia de los modelos 1D, los modelos 2D pueden representar mejor los procesos de desbordamiento, expansión lateral de flujos y acumulación de agua en zonas bajas (Horritt & Bates, 2001).

Entre los aspectos relevantes destacan:

- Las condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo.
- Los coeficientes de rugosidad de Manning (n).
- Los datos hidrometeorológicos empleados.

La correcta representación topográfica es clave para simular adecuadamente procesos de inundación (Apel et al., 2009).

Según (Chaudhry, 2008; U.S. Army Corps of Engineers, 2025), los modelos hidráulicos bidimensionales se fundamentan en la resolución numérica de las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant o ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations, SWE), las cuales representan la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento bajo el supuesto de presión hidrostática y predominio de las dimensiones horizontales respecto a la profundidad del flujo. Estas ecuaciones permiten estimar variables hidráulicas de interés como la profundidad del agua, la velocidad, el esfuerzo cortante y la extensión de la inundación, constituyendo la base matemática de programas ampliamente utilizados en ingeniería hidráulica, tales como HEC-RAS 2D e IBER.

1.2.5. Dinámica de fluidos computacional.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran el flujo de fluidos. CFD permite simular el comportamiento de los fluidos y sus interacciones con superficies y estructuras mediante el uso de computadoras.

La CFD es el arte de reemplazar las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo de fluidos con números y avanzar estos números en el espacio y/o el tiempo para obtener una descripción numérica final del campo de flujo (Versteeg & Malalasekera, 2007).

1.2.6. Ecuación de Saint-Venant 2D

Los modelos hidráulicos bidimensionales se fundamentan en la resolución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, también denominadas ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations, SWE). Estas ecuaciones describen el movimiento del flujo superficial mediante la aplicación de los principios de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento en las direcciones horizontal longitudinal (x) y transversal (y), permitiendo representar la distribución espacial del flujo en ríos, quebradas y planicies de inundación (Chaudhry, 2008; U.S. Army Corps of Engineers, 2025).

Las ecuaciones de Saint-Venant se derivan a partir de las ecuaciones de Navier–Stokes mediante un conjunto de simplificaciones físicas que permiten representar adecuadamente el comportamiento del flujo en canales abiertos. Entre las principales hipótesis se considera que el fluido es incompresible, la presión presenta una distribución hidrostática, la profundidad del flujo es pequeña respecto a las dimensiones horizontales del dominio y las aceleraciones verticales son despreciables. Bajo estas condiciones, las ecuaciones permiten describir con suficiente precisión la propagación de ondas de inundación y la interacción del flujo con la topografía del terreno (Chaudhry, 2008).

Las ecuaciones de Saint-Venant constituyen el fundamento teórico de los modelos hidráulicos bidimensionales modernos utilizados para la simulación del flujo a superficie libre. Software especializado como HEC-RAS 2D e IBER resuelve estas ecuaciones mediante diferentes técnicas de discretización numérica, permitiendo estimar parámetros hidráulicos como el calado, la velocidad del flujo, la elevación de la lámina de agua, el esfuerzo cortante sobre el lecho y la extensión de las áreas inundadas.

En forma conservativa, las ecuaciones bidimensionales pueden expresarse mediante la ecuación de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento en las direcciones x e y.

- **Ecuación de Continuidad.**

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = q \quad \text{.....(Ec. 1)}$$

Donde q representa el aporte o perdida de agua por cada metro cuadrado de terreno del dominio calculado.

La ecuación de continuidad representa el principio de conservación de masa, garantizando que el agua se conserve durante la simulación hidráulica, de modo que no se crea ni se elimina artificialmente dentro del modelo.

En la presente investigación, la variación del agua dentro del dominio depende principalmente del caudal impuesto en la condición de entrada y del flujo que se propaga a través del terreno representado por el MDT, ya que no se consideraron aportes distribuidos como precipitación o infiltración.

- **Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección x.**

Esta ecuación representa la conservación de la cantidad de movimiento en la dirección longitudinal del flujo, considerando los efectos de la pendiente del terreno, la presión hidrostática y la fricción ejercida por el fondo del cauce.

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + \frac{\partial (huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial z}{\partial x} - \tau fx \quad \text{.....(Ec. 2)}$$

- **Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección y.**

Esta ecuación expresa la conservación de la cantidad de movimiento en la dirección transversal del flujo, permitiendo representar adecuadamente cambios de dirección, expansión lateral de la inundación y circulación sobre planicies.

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t}+\frac{\partial(huv)}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2+\frac{1}{2}gh^2\right)=-gh\frac{\partial z}{\partial y}-\tau fy \quad \text{.....(Ec. 3)}$$

Donde:

h : Altura de la lámina de agua (m).

u : Velocidad media en la dirección x (m/s).

v *:* Velocidad media en la dirección y (m/s).

g *:* Aceleración de la gravedad (m/s^2).

z : Elevación de terreno (m).

t : tiempo (s).

x, y : coordenadas espaciales (m).

$\tau fx, \tau fy$ *:* Términos de fricción en las direcciones x e y (N/m^2).

1.2.7. Métodos numéricos y estructuras de malla en modelación hidráulica

1.2.7.1. Métodos numéricos

1.2.7.1.1. Método de Elementos Finitos (FEM)

Se trata de un método numérico que resuelve ecuaciones diferenciales representando la solución como una suma de funciones base continuas, conocidas como funciones de aproximación, que abarcan todo el dominio del problema. Estas funciones se seleccionan para cumplir con las condiciones de contorno, y los parámetros desconocidos se determinan de manera que satisfagan la ecuación diferencial minimizando los residuos a través de funciones de peso (J. Xaman, 2016).

1.6.2.1.2. Método de Diferencias Finitas (FDM)

Este método se utiliza para obtener soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales, aproximando las derivadas mediante diferencias finitas. Consiste en reemplazar las derivadas en la ecuación diferencial con diferencias finitas, que actúan como aproximaciones. Para lograr esto, se emplean las series de Taylor, permitiendo convertir una ecuación diferencial definida en todo el dominio en una ecuación algebraica en un nodo (Fernández, 2012).

1.6.2.1.3. Método de Volúmenes Finitos (FVM)

El Método de Volúmenes Finitos (Finite Volume Method, FVM) es una técnica numérica ampliamente empleada para resolver ecuaciones diferenciales parciales que representan fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía. Su

principal característica consiste en discretizar el dominio de cálculo en un conjunto de volúmenes de control, sobre los cuales se aplica el principio de conservación, garantizando que el balance de las magnitudes físicas se cumpla tanto de forma local como global (Fernández, 2012).

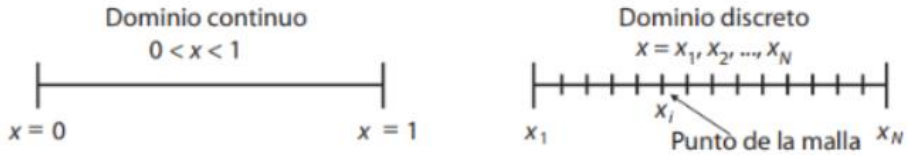
A diferencia del Método de Diferencias Finitas, que aproxima directamente las derivadas en nodos de una malla, el Método de Volúmenes Finitos integra las ecuaciones gobernantes sobre cada volumen de control y evalúa los flujos que atraviesan sus caras. De esta manera, las ecuaciones diferenciales continuas se transforman en un sistema de ecuaciones algebraicas que conserva rigurosamente la masa y la cantidad de movimiento, incluso en geometrías complejas y mallas no estructuradas (Versteeg & Malalasekera, 2007).

1.6.2.2. Discretización Espacial

Esta técnica consiste en dividir el espacio en una serie de puntos finitos. El CFD utiliza esta metodología para transformar un dominio continuo en uno discreto mediante una malla. En un dominio continuo, cada variable de flujo se define en todos los puntos del espacio. Sin embargo, en un dominio discreto, las variables solo se definen en los nodos que componen la malla. Por lo tanto, en una simulación CFD, las variables se calculan exclusivamente en esto nodos, y los valores intermedios se obtienen por interpolación (Fernández, 2012).

Figura 1

Discretización de un dominio



Nota: Fuente (Fernández Oro,2012)

1.6.2.2.1. Mallas estructuradas.

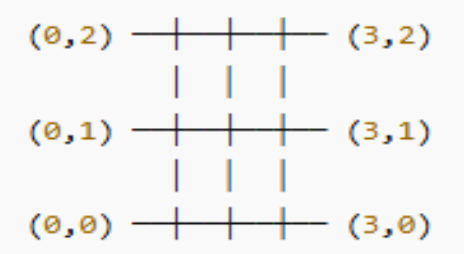
Una malla estructurada es una red de celdas (elementos) dispuestas con un patrón regular y ordenado. Generalmente se componen de celdas cuadradas o rectangulares (en 2D) o cubos/paralelepípedos (en 3D) y las líneas de la malla se cruzan en ángulos rectos.

En una malla estructurada:

- Cada nodo puede identificarse fácilmente por un par de índices *(i,j)* en 2D *(i,j,k)* en 3D.
- La conectividad entre nodos vecinos es uniforme predecible.
- Permite almacenar variables en arreglos (matrices) simples, lo que acelera la implementación y el cálculo numérico.

Por ejemplo, un domino de 2D cuadrado dividido en un numero de celdas de igual tamaño seria generada de la siguiente malla estructurada.

Figura 2
Malla estructurada



Nota: Se muestra una malla 3x3

Una malla estructurada en 2D puede definirse matemáticamente como un conjunto de nodos generados a partir de un sistema de coordenadas cartesianas discretizado:

$x_i = x_{min} + i\Delta x,\ i = 0,1,\ldots.,N_x$ ……..……(Ec. 4)

$y_i = y_{min} + j\Delta y,\ j = 0,1,\ldots.,N_y$ ……..……(Ec. 5)

- N_x y N_y son el número de divisiones x e y respectivamente.
- $\Delta_x = \frac{x_{max} - x_{min}}{N_y}$ y $\Delta_y = \frac{y_{max} - y_{min}}{N_y}$ son los tamaños de celda constantes en cada dirección.

1.2.7.1.2. Mallas no estructuradas:

Una malla no estructurada en 2D se compone de un conjunto de elementos triangulares (o cuadriláteros irregulares), conectados arbitrariamente, sin un patrón regular.

Una malla no estructurada sobre un dominio se define como:

- **Conjunto de nodos (vértices):**

$n\{x_k = (x_k, y_k) \in \Omega | k = 1,2,\ldots,N\}$ ……..……..(Ec. 8)

- **Conjunto de elementos (triángulos):**

$\frac{\partial u}{\partial x} t = \{T_e = (x_i, x_j, x_k) \mid e = 1,2, \dots, E\}$ ……..(Ec. 9)

Donde:

N : Número total de nodos.

E **:** Número total de elementos.

Cada T_e es un triángulo definido por 3 nodos del conjunto N.

Figura 3

Esquema de malla no estructurada



Nota. Fuente (Versteeg & Malalasekera, 2007)

1.2.8. Número de Courant

El número de Courant, también conocido como número CFL en honor a Richard Courant, Kurt Friedrichs y Hans Lewy, quienes publicaron su artículo en 1928, es una condición de convergencia utilizada para resolver ecuaciones diferenciales parciales (Ashgriz & Mostaghimi, 2001). Este número se expresa mediante la siguiente ecuación:

$C = \frac{u}{\Delta x / \Delta t}$ ……..(Ec. 10)

Donde:

- u es la velocidad física y característica del problema.
- Δx, es el tamaño de la malla en la dirección x.
- Δy, es el tamaño de la malla en la dirección y.
- Δt, es el paso del tiempo.
- $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, es la velocidad numérica.

Para conseguir un esquema numérico estable se debe cumplir el rango del número CFL para la estabilidad numérica:

$0 < C = \frac{u}{\Delta x/\Delta t} < 1$ ……..(Ec. 11)

1.2.9. Método del índice de convergencia de malla (GCI)

La selección de un dominio finito en tiempo y espacio introduce errores de discretización en la simulación, lo que hace que una solución numérica sea solo una aproximación a la real. El método GCI cuantifica este error en función del tamaño de la malla, definiéndose como el límite del error relativo entre el resultado computacional y el valor asintótico. Esto especifica el rango de error en el que se sitúa el resultado y la magnitud potencial del error. Además, el GCI revela cuánto mejorará la solución con un mayor refinamiento de la malla, los valores bajos de GCI indican una mayor proximidad a la solución asintótica (Castedo et al., 2019).

El método consiste en comparar la solución exacta con la numérica para calcular el error generado por la discretización, usando la siguiente fórmula:

$E(h) = f_{exacta} - f(h) \approx Ahp$ ……..(Ec.12)

Donde:

- $E(h)$, es el error de discretización.
- f_{exacta}, es la solución exacta.
- $f(h)$, es la solución numérica.
- A, es una constante.
- h, es una medida de la discretización de la malla (tamaño de la malla).
- p, es la tasa u orden de convergencia de la malla.

El método GCI generalmente utiliza tres mallas para su metodología, denominadas (1,2,3). A partir de los valores de las variables obtenidas para cada malla, se puede calcular el orden de convergencia de la malla utilizando la siguiente formula de orden de convergencia de malla.

$p = ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_3}\right)/ln(r)$ ……..(Ec. 13)

Donde r es la razón de refinamiento y se calcula como:

$r = h_3/h_2$ ……..(Ec. 14)

$r = h_2/h_1$ ……..(Ec. 15)

Conociendo el orden de convergencia de la malla, es posible estimar el resultado analítico a través de una solución asintótica para h cuando tiende a cero, utilizando las mallas más finas disponibles. Para ello, se emplea la Ecuación de solución asintótica, que representa la extrapolación de Richardson, la cual consiste en obtener una estimación de orden superior del valor en que el espacio de la malla es cero a partir de valores discretos de orden inferior.

$f_{h\to 0} \approx f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^2 - 1}$ ……..……..……..(Ec. 16)

Finalmente se sugiere el cálculo del índice de convergencia de la malla GCI de la forma:

$GCI_{AB} = \frac{F_S|\varepsilon|}{r^p - 1}$ ……..……..……..(Ec. 17)

Donde:

- GCI_{AB}, es el índice de convergencia de las dos mallas analizadas.
- F_S , es un factor de seguridad igual a 1.25 para tres mallas y tiene un valor de 3 cuando se utilizan dos mallas.
- $|\varepsilon|$, es el error relativo entre la malla más fina y la mas robusta.

Se verifica que las soluciones se encuentran dentro del rango de convergencia asintótica través de los valores de GCI calculados para las tres mallas. La evaluación de la precisión del código y de los cálculos requiere que la malla esté suficientemente refinada para asegurar que la solución se sitúe en dicho rango asintótico. Esta verificación se realiza mediante la aplicación de la Ecuación de convergencia de malla mediante los GCI.

$GCI_{23} = r^p GCI_{12}$ ……..……..……..(Ec. 18)

$\frac{GCI_{23}}{r^p GCI_{12}} \approx 1.0$ ……..……..……..(Ec. 19)

En estudios de sensibilidad numérica, la selección de una resolución del MDT o de un tamaño de malla no debe basarse únicamente en un indicador de convergencia, sino en la evaluación conjunta de la consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

1.2.10. Costos incrementales de convergencia de malla.

Según Roache (1998) los costos incrementales de convergencia de malla representan el aumento progresivo del costo computacional requerido para obtener mejoras cada

vez menores en la precisión numérica mediante el refinamiento de la malla. Conforme la solución se aproxima a la región asintótica de convergencia, el tiempo de procesamiento y el número de elementos aumentan significativamente, mientras que la reducción del error de discretización se vuelve cada vez más pequeña, permitiendo identificar una resolución de malla óptima basada en la relación precisión–costo computacional.

Para el cálculo de esta variación nos da la fórmula de costo:

$Cost(n) = \frac{Cost(1)}{r^{D(n-1)}}$ ……..……..…….....(Ec. 20)

Donde:

- *n* es el tamaño de malla
- *r* es la relación o razón efectiva.
- *D* representa a la dimensión.
- *Cost(1)* representa la unidad en la malla más fina.

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

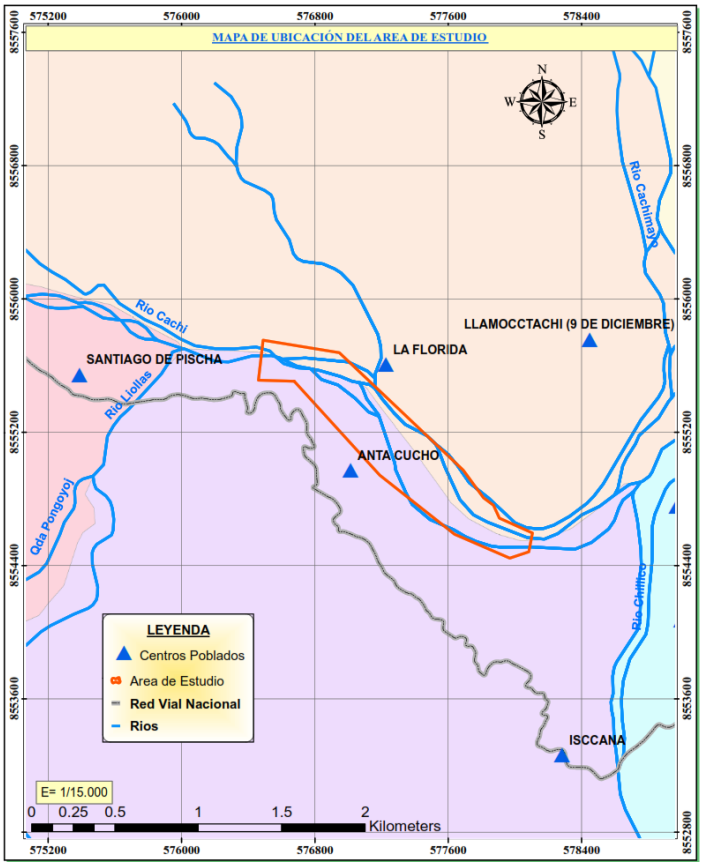
2.1.1. Zona de estudio

El valle de Antacucho, se encuentra ubicado en la parte noroeste de la provincia de Huamanga a 26.4 km de la ciudad de Ayacucho, vía PE-26B Ayacucho – San José de Ticllas a 2435 m.s.n.m.

El tramo de estudio corresponde a un sector del rio ubicado en el valle de Antacucho con una longitud aproximada de 2.08 km, su plano planta-perfil, lo que permite representar adecuadamente el comportamiento hidráulico del cauce y de la planicie de inundación para los fines de la presente investigación.

Figura 4

Vista principal de la zona de estudio



La selección de este tramo se realizó considerando criterios hidrológicos y geomorfológicos, debido a que presenta un cauce representativo, una planicie de

inundación bien definida y antecedentes de desbordamientos durante eventos de lluvias intensas. Asimismo, el tramo comprende áreas agrícolas e infraestructura susceptible de afectación por inundaciones, lo que lo convierte en un sector representativo para evaluar el comportamiento hidráulico del flujo y la influencia de la resolución del modelo digital del terreno en las simulaciones realizadas con HEC-RAS e IBER.

2.1.2. Ubicación política

Región : Ayacucho

Provincia : Huamanga

Distrito : San José de Ticllas

Localidad: : Valle de Antacucho

2.1.3. Ubicación geográfica

Sur : 8554968.233 m S

Este : 577259.552 m E

Altitud : 2435.607 msnm

2.1.4. Limites

Tabla 2

Límite del distrito de San José de Ticllas

Dirección	Limite	Dirección	Limite
Norte	Santiago de Pischa	Este	Socos
Sur	Vinchos, Socos	Oeste	Santiago de Pisha, Vinchos

Nota. Límites políticos del distrito de San José de Ticllas, adaptado.

Figura 5

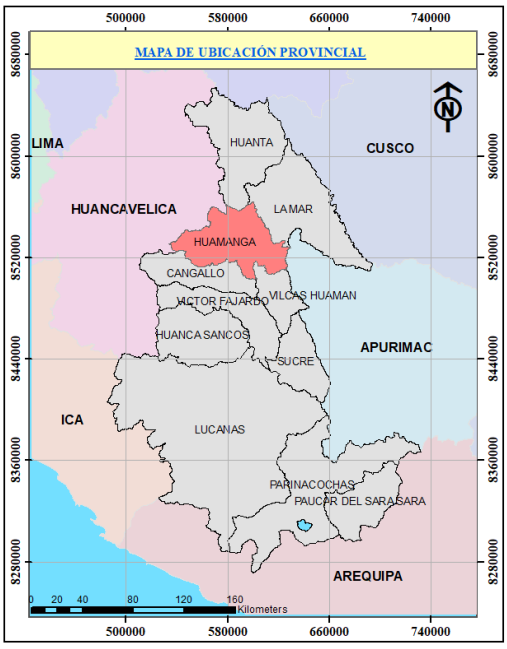
Mapa departamental del proyecto



Nota. Este mapa ha sido elaborado para ilustrar la ubicación departamental del proyecto en el territorio nacional.

Figura 6

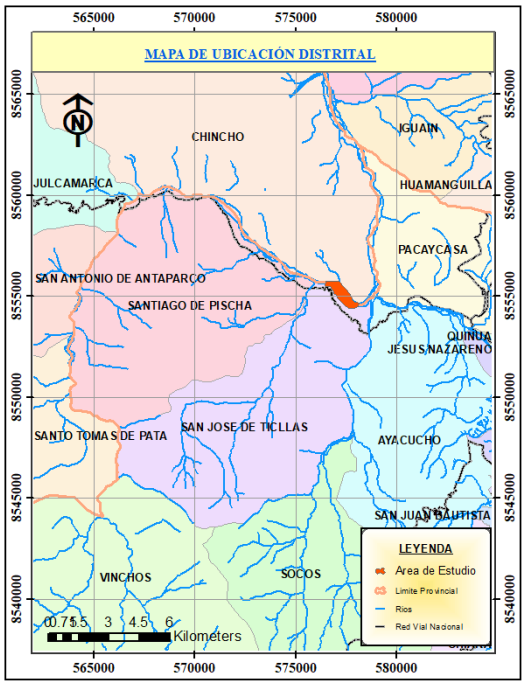
Mapa provincial del proyecto



Nota. Este mapa ha sido elaborado para representar la distribución provincial del proyecto, señalando las principales áreas de intervención del proyecto en la provincia de Huamanga.

Figura 7

Mapa distrital del proyecto



Nota. El mapa ha sido elaborado para representar la distribución provincia de Huamanga, área de intervención de la tesis ubicada en el distrito de San José de Ticllas, Valle Antacucho.

Figura 8

Zona de intervención de la tesis



Nota. Esta muestra la zona de trabajo y la variación topográfica del valle Antacucho.

2.1.5. Accesibilidad

Tabla 3
Vías de acceso para llegar hacia la zona de estudio

Ruta	Distancia	Tiempo	Estado
Huamanga – Repartición Compañía	17 km	0.38 hr	Asfaltado
Repartición compañía – valle Antacucho	9.3 km	0.22 hr	Asfaltado básico
Total	**125 km**	**1 hr**	

Nota. Esta tabla muestra la distancia, tiempo estimado de viaje y el estado del pavimento de la ruta entre Huamanga y el valle de Antacucho. Los datos son aproximados. Fuente: MTC

2.1.6. Clima de la zona de estudio

En el valle de Antacucho se presentan precipitaciones pluviales promedio varían de 500 mm a 600 mm anuales y la temperatura varía de los 12 °C a 28 °C en la zona alta y el rio Cachi respectivamente, las zonas de vida en la zona de estudio se presentan como:

Monte espinoso Subtropical (mte- S), es una zona de vida de clima cálido y seco, con presencia de escasas lluvias y vegetación dominada por arbustos espinosos, esta es una característica neta del valle de Antacucho.

Las vegetaciones predominantes son:

- Huarango
- Molle
- Retama
- Tuna
- Cabuya

2.1.7. Topografía de la zona de estudio:

El valle de Antacucho es representativo de valles interandinos o planicies de inundación el cual tiene una topografía llana, la altitud varía desde 2420.65 msnm al 2492.34 msnm, con áreas de cultivo al borde del cauce del río Cachi.

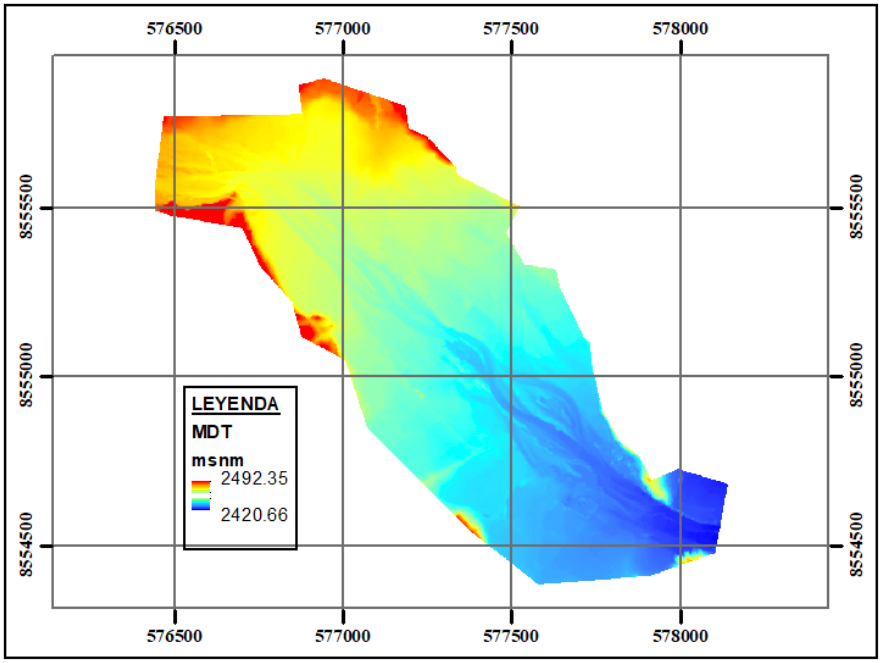
Figura 9

Topografía de la zona de estudio vista aérea.



Figura 10

Modelo Digital de Terreno (MDT)



Nota. Se muestra la variación topográfica de la zona de proyecto

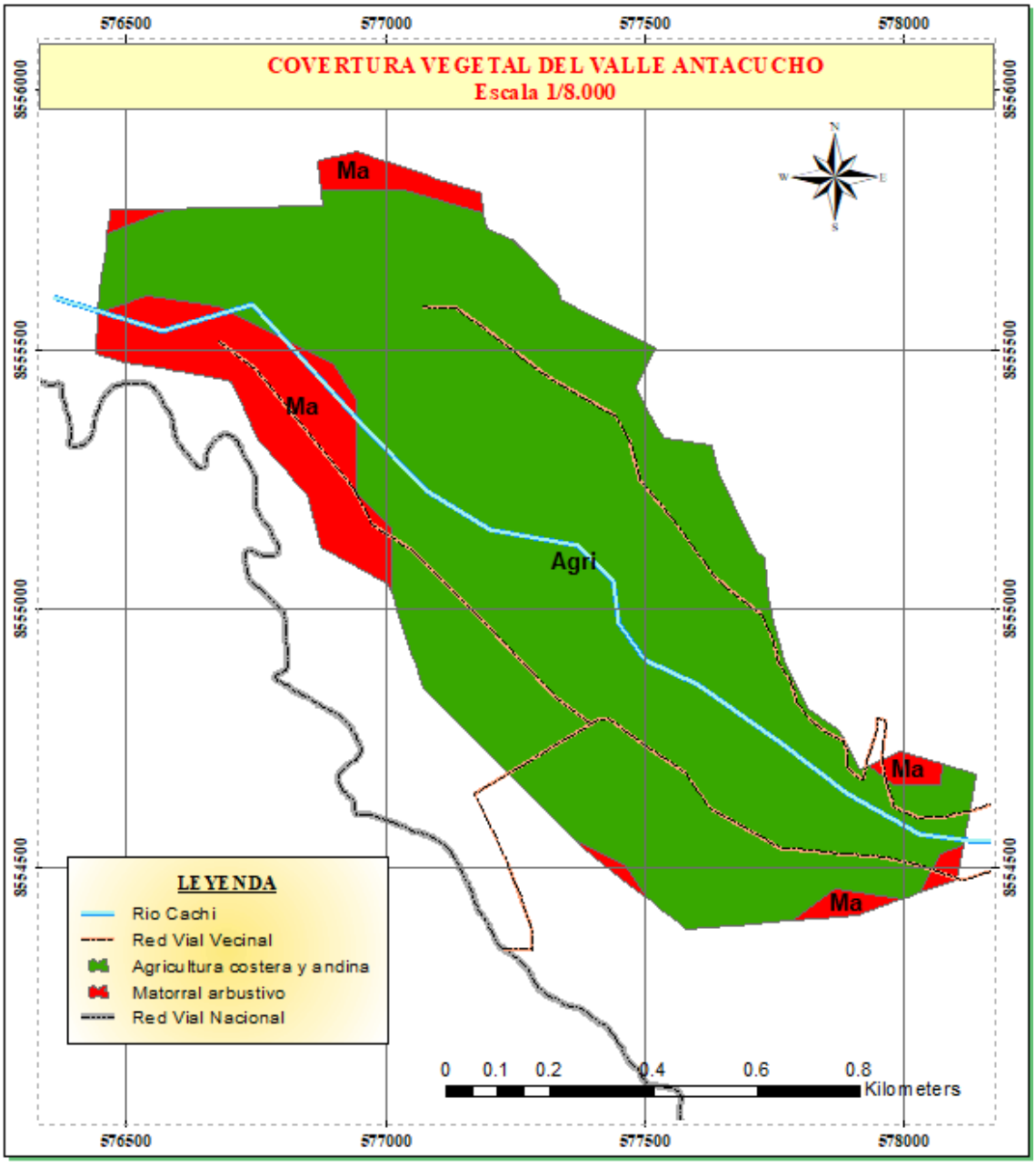
2.1.8. Uso de suelo

En el valle de Antacucho el uso del suelo es dedicado a la agricultura, se tiene cultivos como el alfalfa, maíz, lechuga y brócoli estas son comercializado en el mercado local de la ciudad de huamanga, según el mapa de cobertura vegetal la zona de estudio

cuenta con 0.95 km^2 de agricultura costera y andina (Agri) y 0.14 km^2 de matorral arbustivo (Ma) como se puede observar en el siguiente mapa:

Figura 11

Cobertura vegetal de la zona de estudio



Nota. Se muestra el uso de suelo representativo de la zona de proyecto

2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

2.2.1. Materiales y equipos en campo

- Flexómetro
- Libreta de campo

- Casco
- Chaleco
- GPS Diferencial SOUTH Galaxy G3
- Aeronave no tripulada AUTEL EVO II PRO RTK
- Cámara fotográfica

2.2.2. Materiales y equipos en oficina

- Laptop Intel Core i5 16GB de RAM
- Computadora Intel Core i7 16GB de RAM
- Impresora multifunción
- Papel bond A4 y A3
- Lapiceros

2.2.3. Programa de ingeniería

- Microsoft Office
- AutoCAD Civil 3D 2023
- ArcGIS 10.8.0
- Google Earth
- QGIS 3.44.9
- HEC-RAS 6.7 Beta 4a
- IBER 3.3.1
- Agisoft Metashape Professional 2.0.0

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. Método de investigación

Método de investigación es el procedimiento metódico y estructurado para abordar un reto o tema de investigación el tema, la determinación del tema de investigación, la recopilación y el análisis de datos, y la presentación de conclusiones y sugerencias son componentes de una metodología de investigación (Medina et al., 2023).

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, orientado al análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones mediante mallas estructuradas y no estructuradas en el valle de Antacucho. Para ello, se analizarán datos numéricos obtenidos del modelamiento hidráulico en distintos escenarios, con la finalidad de medir las variables de influencia.

2.3.2. Tipo de investigación

La investigación aplicada se orienta a la solución de problemas específicos mediante la utilización del conocimiento científico (Torres, 2010)

El proyecto es de tipo aplicada, ya que busca resolver un problema práctico relacionado con la influencia de la resolución del MDT y del tamaño de malla sobre el comportamiento hidráulico y la eficiencia computacional de modelos bidimensionales. Se enmarca en un enfoque cuantitativo, al analizar datos numéricos obtenidos de simulaciones computacionales. Además, es comparativo y explicativo, porque contrasta los resultados obtenidos mediante los modelos hidráulicos HEC-RAS 2D e IBER y explica el efecto de la resolución del terreno en la simulación hidráulica. Su diseño es no experimental, ya que no se manipulan variables directamente, sino que se observan los resultados generados por modelos digitales bajo distintos escenarios.

2.3.3. Nivel de investigación

Explicativa: porque busca identificar y explicar cómo la variación en la resolución del modelo digital de terreno (MDT) influye en los resultados de las simulaciones hidráulicas.

2.3.4. Diseño de investigación

No experimental-comparativo: El diseño de la investigación es no experimental y comparativo, debido a que las variables de estudio no serán manipuladas de manera directa, sino analizadas en su contexto natural mediante el modelamiento hidráulico. Asimismo, es comparativo porque se evaluarán y contrastarán los resultados obtenidos con diferentes resoluciones de MDT y tipos de mallas estructuradas y no estructuradas en la simulación de inundaciones del valle de Antacucho.

2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

2.4.1. Técnicas

Para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas de observación técnica, revisión de estudios hidrológicos, datos topográficos y antecedentes relacionados con modelamiento hidráulico e inundaciones, procesamiento geoespacial y simulación hidráulica computacional.

La observación permitió identificar las características físicas e hidráulicas del área de estudio y comparar las mallas estructuradas y no estructuradas en una simulación hidráulica computacional.

2.4.2. Instrumentos

Como instrumentos se utilizaron fichas bibliográficas, modelos digitales del terreno (MDT), ortofoto e imágenes satelitales, asimismo se emplearon software especializado como ArcGIS, QGIS, HEC-RAS, IBER para el procesamiento geoespacial y simulación hidráulica mediante mallas estructuradas y no estructuradas, permitiendo comparar los resultados obtenidos según el tipo de malla y con una resolución alta del MDT.

2.5. LA POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO DE PROYECTO

2.5.1. Población

En esta investigación, la población se entiende como el conjunto de elementos o unidades de estudio que comparten características específicas y sobre los cuales se pretende generalizar los resultados(Hernández et al., 2014).

La población de estudio estuvo constituida por todas las resoluciones de Modelos Digitales de Terreno (MDT) y configuraciones de mallas numéricas aplicables a la simulación de inundaciones bidimensionales en el valle Antacucho – Ayacucho mediante modelos hidráulicos bidimensionales implementados en HEC-RAS 2D e IBER.

2.5.2. Muestra

La muestra es un subconjunto de la población del cual se recolectan los datos y debe ser representativo de dicha población para obtener resultados válidos dentro de una investigación (Hernández et al., 2014).

La muestra estuvo conformada por las resoluciones de MDT (1m, 2m, 3m, 4m y 5 m) y tamaños de malla (1x1, 2x2, 3x3, 4x4 y 5x5) seleccionados para la ejecución de las simulaciones hidráulicas, considerando aquellas que presentan mayor aplicabilidad y disponibilidad para el análisis comparativo de inundaciones dentro del área de estudio.

2.6. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

2.6.1. MDT (Modelo digital del terreno)

Para el presente proyecto se realizó el trabajo de levantamiento topográfico con fotogrametría aérea apoyados con GPS diferencial estático (DGPS/RTK), lo cual fue procesado y corregido con el uso del software Agisoft Metashape en el área de estudio es de 1.1 km^2.

2.6.1.1. Planificación del levantamiento aerofotogramétrico

Se hizo una primera visita a la zona de trabajo, esto se realizó el día anterior al levantamiento topográfico y fue con la finalidad de buscar el mejor lugar para poder

iniciar los vuelos; además, de ubicar los lugares donde se colocarán los puntos de control, se hizo un reconocimiento general del área de trabajo para detectar interferencias (postes, arboles, antenas, etc) con el fin de realizar el vuelo lo más seguro posible.

Figura 12
Planificación del vuelo en el valle de Antacucho



Nota. Se muestra la variación topográfica de la zona de proyecto

2.6.1.2. Trabajo de campo en el levantamiento Aero fotogramétrico

Antes de realizar el vuelo se incorporó información en la programación de vuelo, estos datos se describen a continuación.

- Altura de vuelo se considera en base a la topografía del terreno, presencia de árboles, antenas, postes, etc. Por lo tanto, se tomó una altura de vuelo de 80 metros, para la seguridad del equipo y obtener imágenes de mayor precisión.
- Intersección lateral y frontal de fotografías se decidió una intersección entre imágenes mayor al 50% tanto lateral como frontal, esto se tomó en cuenta debido a que la topografía de la zona es llana y tendrá un mejor enfocado el área del terreno que se capture en los distintos lados.
- Con ayuda de la aplicación “AUTEL EXPLORER EVO II V3” se realizó la ruta de vuelo, en esta aplicación se incorporó la información de altura de vuelo, intersección lateral y frontal, con ellos la aplicación calculará automáticamente la cantidad de fotografías, intervalo de tiempo entre fotografías y la resolución de

la imagen, en la siguiente imagen se muestra la programación de vuelo para la zona del proyecto.

Figura 13
Vista aérea del valle Antacucho.



*Nota. S*e muestra las características y el área de inundación el valle Antacucho.

2.6.1.3. Puntos de control

Los puntos de control son necesarios para poder georreferenciar correctamente las fotografías y el resultado final, el procedimiento de la recolección de los puntos de control, estos se marcaron con yeso para ser visualizados en las fotografías capturadas por el dron y ser medidas, teniendo así sus coordenadas correctas, en la siguiente figura se muestra los puntos de control.

Figura 14
Puntos de control dejados en el terreno



*Nota. S*e muestra los puntos de control dejados aproximadamente 2x2 metros en forma de cruz para su visualización y toma de datos en el punto de intersección.

Tabla 4
Puntos de control tomadas en campo

Descripción	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)
PC1	577960.244	8554512.785	2423.908
PC2	577754.825	8554674.409	2427.173
PC3	577137.203	8555151.372	2438.01
PC4	577966.726	8554582.308	2422.807
PC5	577697.536	8554772.221	2426.566
PC6	576854.305	8555440.533	2442.112
PC7	576816.205	8555515.402	2444.262
PC8	576986.234	8555353.519	2441.274
PC9	577154.617	8555240.731	2438.747
PC10	577376.2	8555124.602	2436.226
PC11	577430.889	8555083.708	2433.276
PC12	577459.265	8555014.665	2432.893

Nota. Todos los puntos de control están referenciados en coordenadas WGS-84 UTM18s

2.6.1.4. Procesamiento del MDT en Agisoft Metashape

Agisoft Metashape es un software de fotogrametría digital desarrollado por Agisoft, utilizado para el procesamiento de imágenes y generación de modelos tridimensionales, ortomosaico y modelos digitales del terreno (MDT). El programa permite transformar fotografías obtenidas mediante drones, cámaras terrestres o sensores en información espacial de alta precisión aplicada en topografía, ingeniería, GIS y estudios hidráulicos (Agisoft LLC., 2024).

Para el procesamiento se procede a la importación de fotografías y orientación de fotos para reducir errores de ubicación y llegar a coincidir ambos levantamientos topográficos, se procedió a la colocación de los puntos de control que fueron captados mediante una marca con yeso, estas fueron colocadas sobre puntos anteriormente medidos, para ello se procede a la colocación de marcadores (puntos de control) en cada una de las fotografías en la que aparecen y posterior a ello se continua con los parámetros de procesamiento.

Tabla 5
Parámetros de Procesamiento

Parámetros de procesamiento	Tamaño de archivo	Tiempo de procesamiento
Puntos de paso	2.76 GB	7 minutos 42 segundos
Mapas de profundidad	1.65 GB	20 minutos 59 segundos
Nube de puntos	5.34 GB	32 minutos 12 segundos
Malla	2.24 GB	03 minutos 38 segundos
MDE	388.26 MB	1 minuto 3 segundos
Ortomosaico	17.88 GB	18 minutos 29 segundos

Nota. Se muestra los procesos de procesamiento y pasos a seguir durante el procesamiento de creación del modelo digital de elevación y ortomosaico.

2.6.1.5. Exportación de resultados

Una vez realizado los procesos anteriores se procede a exportar los resultados, en este caso se realizará la exportación en formato TIF, del resultado de proceso se tiene un modelo digital de terreno con una resolución de 0.49 m.

El programa Agisoft Metashape tiene la función de exportar el MDT en las resoluciones que se requiere en el presente proyecto, los cuales son 1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

Tabla 6
Modelo digital de terreno (MDT)

MDT (m)	Tamaño de archivo
1x1	4.10 MB
2x2	1.07 MB
3X3	507 KB
4X4	277 KB
5X5	183 KB

Nota. Se muestra las resoluciones de MDT y el tamaño de archivo en para cada una.

2.6.2. Datos hidrológicos de caudal máximo

Para el caudal máximo, se tomó como referencia una tesis desarrollada en la zona de estudio, en la cual se determinaron los gastos máximos asociados a períodos de retorno de 50, 100 y 200 años para el río Cachi.

Figura 15
Caudal máximo por TR para la cuenca Cachi.

Descripción	Área A (Km²)	Qmax (m³/s) Tr=50 años	Qmax (m³/s) Tr=100 años	Qmax años (m³/s) Tr=200 años
SUBCUENCA A	356.57	122.70	150.90	181.20
SUBCUENCA B	394.94	208.10	232.20	254.70
SUBCUENCA C	261.84	106.70	133.50	162.50
SUBCUENCA D	243.32	73.00	92.70	114.00
SUBCUENCA E	242.28	141.50	159.30	176.00
SUBCUENCA F	146.22	33.60	40.50	47.50
UNION-1	1013.35	410.90	482.10	554.30
UNION-2	1498.95	600.50	712.00	825.60
PUNTO DE AFORO	**1645.17**	**631.80**	**749.00**	**868.30**

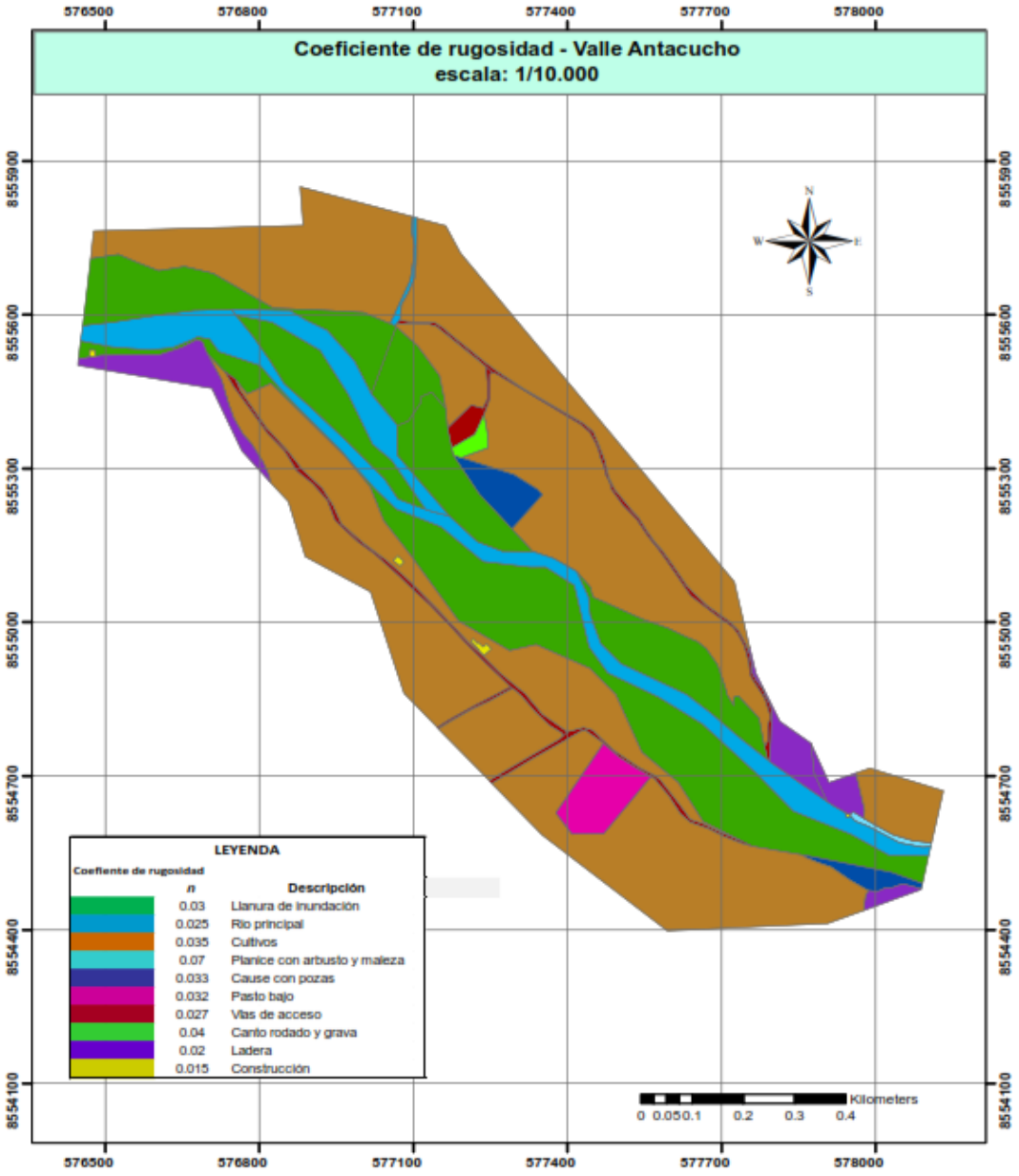
Nota. (Fernández, 2016)

Para el presente estudio, se considerará un caudal correspondiente a un período de retorno de 100 años, equivalente a 749 m^3/s.

2.6.3. Rugosidad en el rio Cachi.

Para la elaboración del mapa de rugosidad del área de estudio, se identificaron los diferentes usos de suelo presentes en las márgenes izquierda y derecha del cauce, así como las zonas de explotación de agregados existentes en el sector. Esta identificación permitió definir de manera más precisa los coeficientes de rugosidad, utilizando como apoyo el ortomosaico obtenido a partir del levantamiento topográfico realizado en la zona.

Figura 16
Valores de coeficiente de rugosidad (n)



Nota. Se muestra los valores de coeficientes de rugosidad según el valor designado en el área de estudio.

2.6.4. Modelamiento Hidráulico en HEC-RAS

2.6.4.1. Plan de simulaciones a realizarse

En el presente estudio se plantearon 25 simulaciones hidráulicas con el objetivo de analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) sobre el comportamiento de las mallas estructuradas. Para ello, se consideraron cinco resoluciones diferentes del MDT y tamaños de malla que varían desde 1×1 m hasta 5×5 m.

Mediante estas simulaciones, se evaluará cómo la variación en la resolución del terreno influye en la precisión de los resultados hidráulicos, la representación de las zonas inundables, la estabilidad numérica y los tiempos de procesamiento del modelo. De esta manera, se busca identificar la combinación más adecuada entre resolución del MDT y tamaño de malla, permitiendo obtener simulaciones más confiables y eficientes para el análisis hidráulico e inundaciones.

Tabla 7

Plan de simulaciones con mallas estructuradas

Resolución de MDT (m)	caudal (m^3/s)	Código	Malla	Resultados esperados
1	749	HR1-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR1-M2x2	2x2	
		HR1-M3x3	3x3	
		HR1-M4x4	4x4	
		HR1-M5x5	5x5	
2	749	HR2-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR2-M2x2	2x2	
		HR2-M3x3	3x3	
		HR2-M4x4	4x4	
		HR2-M5x5	5x5	
3	749	HR3-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR3-M2x2	2x2	
		HR3-M3x3	3x3	
		HR3-M4x4	4x4	
		HR3-M5x5	5x5	
4	749	HR4-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR4-M2x2	2x2	
		HR4-M3x3	3x3	
		HR4-M4x4	4x4	
		HR4-M5x5	5x5	
5	749	HR5-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		HR5-M2x2	2x2	
		HR5-M3x3	3x3	
		HR5-M4x4	4x4	
		HR5-M5x5	5x5	

Nota. Se muestra las 25 simulaciones en el software HEC-RAS.

2.6.4.2. Diagrama de metodología

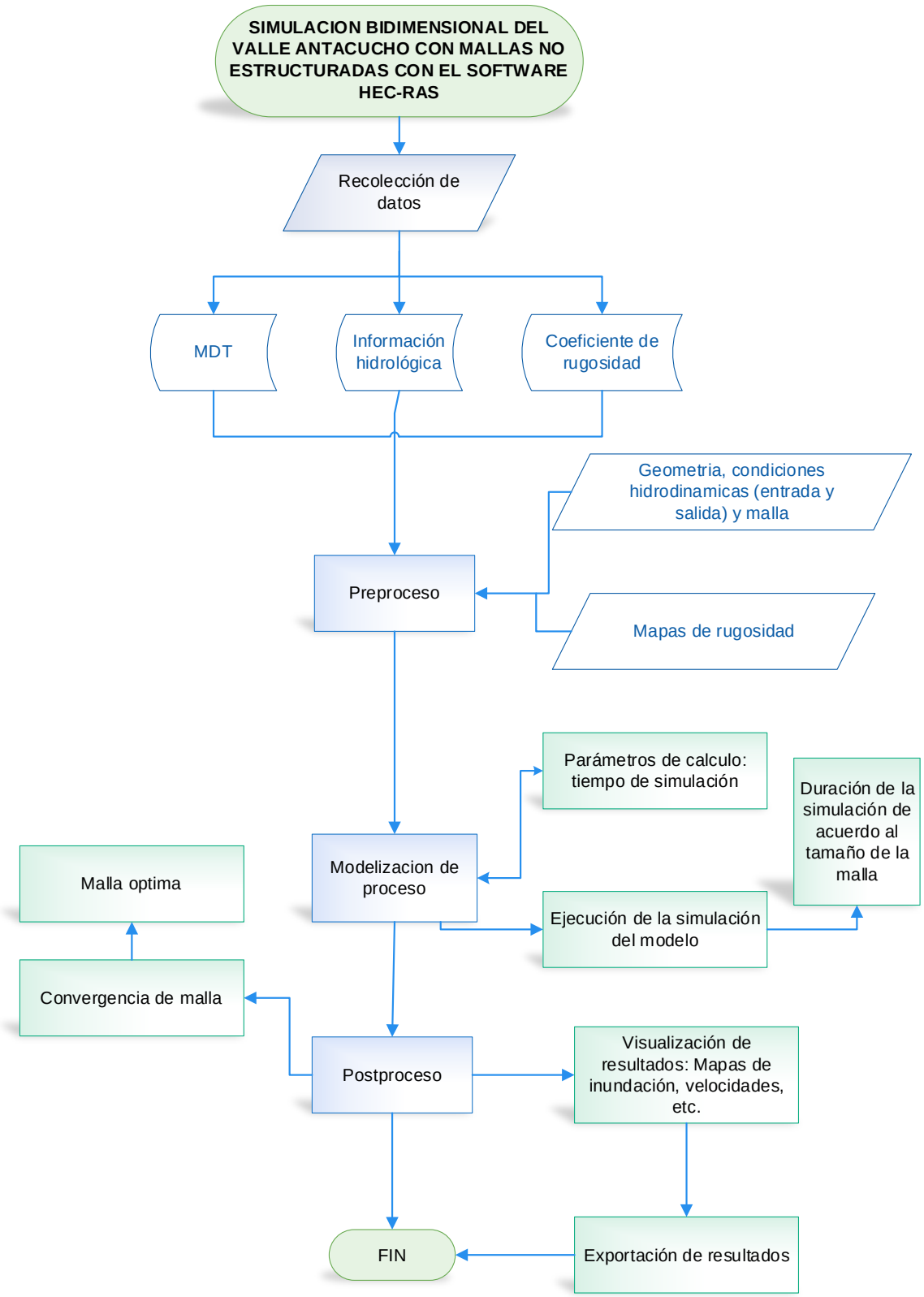
Para efectuar las simulaciones en HEC-RAS, es necesario considerar tres etapas principales dentro del proceso de modelación.

- **Preproceso:** En esta etapa se importa la geometría correspondiente al área de estudio y se importa la topografía, las rugosidades de Manning, condiciones de contorno de ingreso y salida, se crea las mallas estructuradas según el plan de simulaciones.
- **Modelización de Proceso:** Se ejecuta el cálculo de la simulación del modelo y genera un archivo de exportación para ArcView.
- **Postproceso:** Genera los resultados finales, áreas de inundación para cada simulación.

Para un mejor entendimiento se elaboró un flujograma de la simulación.

Figura 17

Diagrama de metodología para mallas estructuradas



Nota. Se muestra el diagrama o pasos a seguir para la simulación en software HEC-RAS.

2.6.4.3. Preproceso

Para el modelamiento bidimensional con mallas estructuradas en HEC-RAS se inicia con la recopilación de información básica necesaria, como el modelo digital de terreno (MDT), caudal de diseño, coeficiente de rugosidad de Manning, y delimitación del área de estudio.

Posteriormente se importa el terreno, con el interfaz RAS Mapper se crea un nuevo archivo Terrain desde un archivo .tif, con este paso se genera la topografía del terreno en archivo. hdf, una vez creado se verifica visualmente que no haya errores en la zona de interés.

Posteriormente, se generó la malla estructurada sobre la geometría exportada del área de estudio. Para el presente proyecto, se consideraron tamaños de malla de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m y 5 m, con la finalidad de evaluar la influencia de la resolución de la malla.

Para el presente proyecto se realizó cinco tipos de mallas, con el cual se simulo el caudal de 749 m3/s, en la tabla 9 se muestra el tamaño de malla no estructurado y número de elementos generados.

Tabla 8

Tamaño de malla y número de elementos de mallas estructuradas

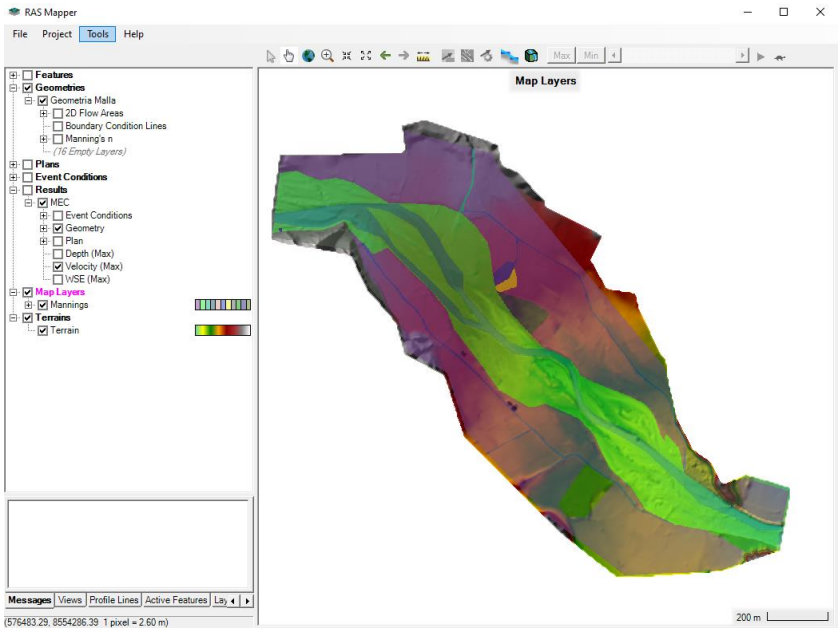
Tamaño de malla	Número de elementos
1x1	590,739
2x2	147,414
3x3	65,383
4x4	36,711
5x5	23,454

Para asignar el mapa de rugosidad en HEC-RAS se utiliza para asignar los coeficientes de Manning *(n)* según el tipo de cobertura del terreno, permitiendo representar de manera más realista la resistencia al flujo.

- **Paso 1:** Crear un archivo en formato Shapefile (.shp) con los identificadores asociados a los diferentes valores de rugosidad.

- **Paso 2:** Asignar automáticamente sobre la malla con la herramienta “New Land Cover”.

Figura 18
Usos de suelo asignado en HEC-RAS



Como siguiente paso se introduce el caudal de diseño en las condiciones de contorno de entrada y salida en la entrada se coloca un hidrograma con un caudal de 749 m^3/s distribuidos en 30 minutos cada 5 minutos para obtener un resultado más realista, de la misma forma se coloca el pendiente de terreno el cual se obtuvo del plano planta perfil lo cual es de 0.014 m/m. en las condiciones de salida solo se considera una profundidad normal ya que se trata de un rio natural con una pendiente de 0.014 m/m. con ello se continua con el proceso o simulación.

2.6.4.4. Proceso

Una vez culminada la etapa de preproceso, se procede con la ejecución del modelo y la resolución de las ecuaciones hidráulicas, etapa conocida como fase de procesamiento. Para desarrollar esta fase, es necesario considerar las capacidades del hardware del equipo utilizado en la simulación, así como los esquemas numéricos empleados para la resolución de las ecuaciones y los parámetros definidos para el correcto funcionamiento del modelo.

2.6.4.4.1. Hardware empleado.

Para la simulación se utilizó una computadora cuyas características de hardware son:

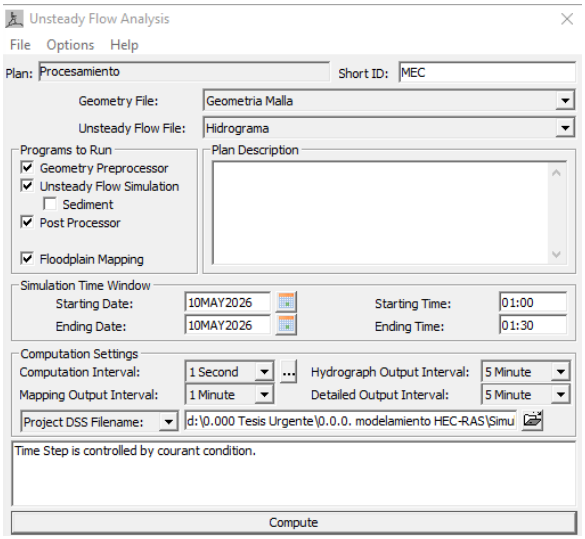
Tabla 9
Características de la computadora

Características de la computadora de simulación	
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz, 2.90 GHz
Núcleos	8
Procesadores lógicos	16
RAM instalada	16 GB
RAM Utilizable	15.9 GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650 (4 GB)

2.6.4.4.2. Análisis de flujo no permanente.

El análisis de flujo no permanente (Unsteady Flow Analysis) en HEC-RAS permite representar el comportamiento hidráulico de un cauce cuando variables como el caudal, la velocidad y el nivel del agua varían en función del tiempo y del espacio. Este tipo de análisis es ampliamente utilizado para la simulación de inundaciones, avenidas máximas y propagación de ondas de crecida, debido a que reproduce de manera más realista las condiciones hidráulicas naturales. Para ello, el programa resuelve las ecuaciones de Saint-Venant, basadas en los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento(U.S. Army Corps of Engineers, 2025).

Figura 19
Interfaz de análisis de flujo no permanente



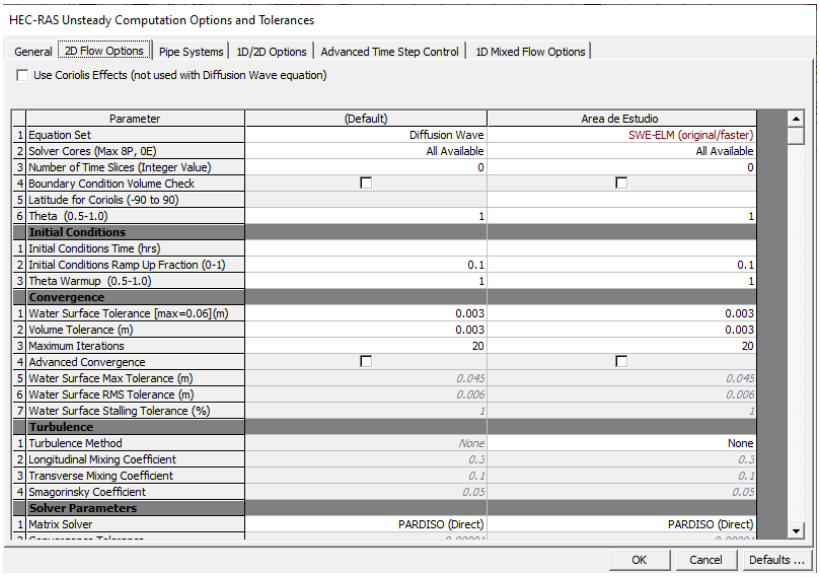
2.6.4.4.3. Opciones y tolerancia de cálculo en HEC-RAS

La opción SWE-ELM (original/faster) en HEC-RAS corresponde al solucionador numérico empleado para resolver las ecuaciones de aguas someras (Shallow Water

Equations). Este solucionador permite simular el comportamiento bidimensional del flujo, considerando las variaciones de profundidad y velocidad del agua tanto en el espacio como en el tiempo, lo que facilita una representación más precisa del comportamiento hidráulico en zonas inundables y cauces naturales.

Figura 20

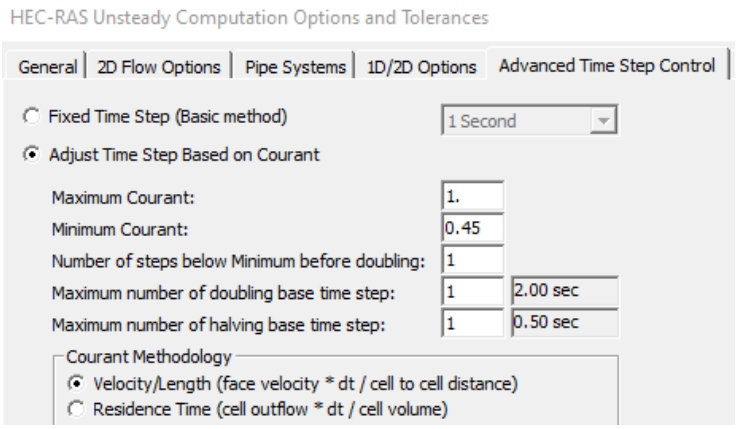
Ecuación de cómputo en HEC-RAS



En el presente proyecto, se ajustó el paso de tiempo durante la simulación con el objetivo de mantener la estabilidad numérica, evitar errores y reducir los tiempos de cálculo. Para ello, se estableció un valor máximo de Courant igual a 1 y un valor mínimo de Courant de 0.45, de manera similar a la configuración empleada en IBER.

Figura 21

Ajuste de número de Courant en HEC-RAS

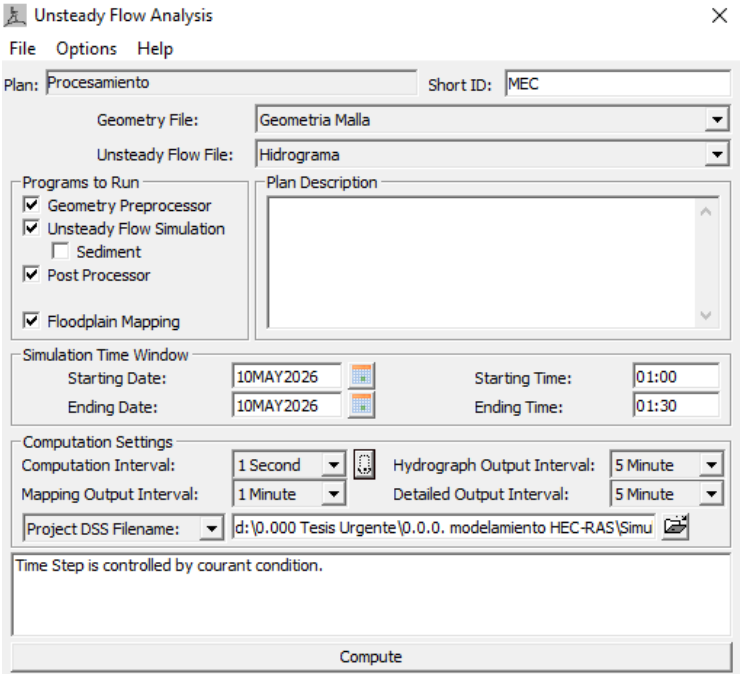


El tiempo de simulación considerado para el presente proyecto fue de 30 minutos; para ello, se configuró un periodo comprendido entre las 01:00 y las 01:30 horas. Asimismo,

se estableció un intervalo de cálculo de 1 segundo para el proceso de simulación hidráulica.

Figura 22

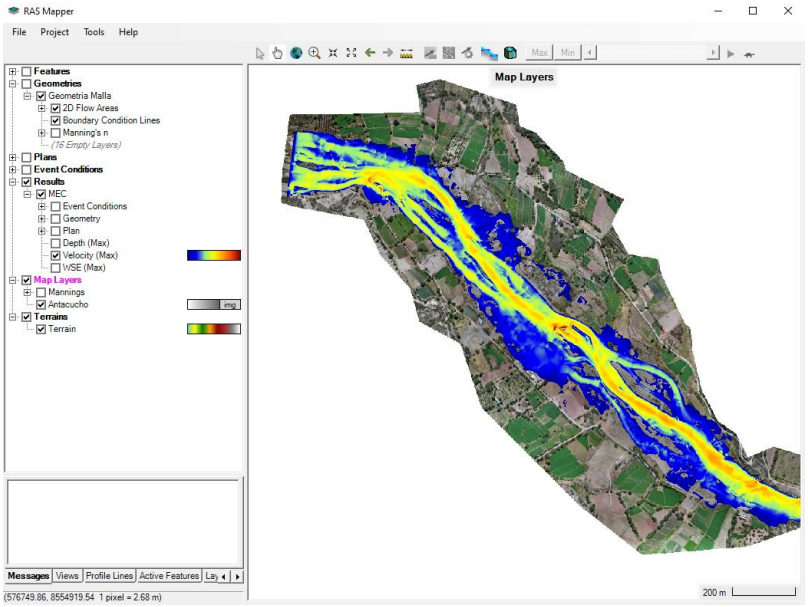
Herramienta de "Unsteady Flow Analysis"



2.6.4.5. Post-proceso

Después de ejecutar el cálculo de la simulación, los resultados fueron visualizados en RAS Mapper de HEC-RAS. En esta herramienta es posible observar diferentes parámetros hidráulicos, tales como el calado expresado en metros (m), la velocidad del flujo en metros por segundo (m/s) y la cota de la superficie del agua en metros (m). Asimismo, los resultados pueden representarse mediante mapas de colores, facilitando la interpretación y análisis del comportamiento hidráulico en el área de estudio.

Figura 23
Visualización de resultados en HEC-RAS



Nota. Se muestra las zonas inundadas de color azul y amarillo.

2.6.5. Modelamiento hidráulico bidimensional en IBER.

2.6.5.1. Plan de simulaciones a realizarse

En el presente estudio se plantearon 25 simulaciones hidráulicas con el objetivo de analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) sobre el comportamiento de las mallas no estructuradas. Para ello, se consideraron cinco resoluciones diferentes del MDT y tamaños de malla que varían desde 1×1 m hasta 5×5 m.

Mediante estas simulaciones, se evaluará cómo la variación en la resolución del terreno influye en la precisión de los resultados hidráulicos, la representación de las zonas inundables, la estabilidad numérica y los tiempos de procesamiento del modelo. De esta manera, se busca identificar la combinación más adecuada entre resolución del MDT y tamaño de malla, permitiendo obtener simulaciones más confiables y eficientes para el análisis hidráulico e inundaciones.

Tabla 10
Plan de simulaciones con mallas no estructuradas

Resolución de MDT (m)	caudal (m^3/s)	Código	Malla	Resultados esperados
1	749	IR1-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR1-M2x2	2x2	
		IR1-M3x3	3x3	
		IR1-M4x4	4x4	
		IR1-M5x5	5x5	
2	749	IR2-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR2-M2x2	2x2	
		IR2-M3x3	3x3	
		IR2-M4x4	4x4	
		IR2-M5x5	5x5	
3	749	IR3-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR3-M2x2	2x2	
		IR3-M3x3	3x3	
		IR3-M4x4	4x4	
		IR3-M5x5	5x5	
4	749	IR4-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR4-M2x2	2x2	
		IR4-M3x3	3x3	
		IR4-M4x4	4x4	
		IR4-M5x5	5x5	
5	749	IR5-M1x1	1x1	Área inundada, tirante máximo, velocidad máxima y tiempo de procesamiento
		IR5-M2x2	2x2	
		IR5-M3x3	3x3	
		IR5-M4x4	4x4	
		IR5-M5x5	5x5	

Nota. Se muestra las 25 simulaciones en el software IBER.

2.6.5.2. Diagrama de metodología

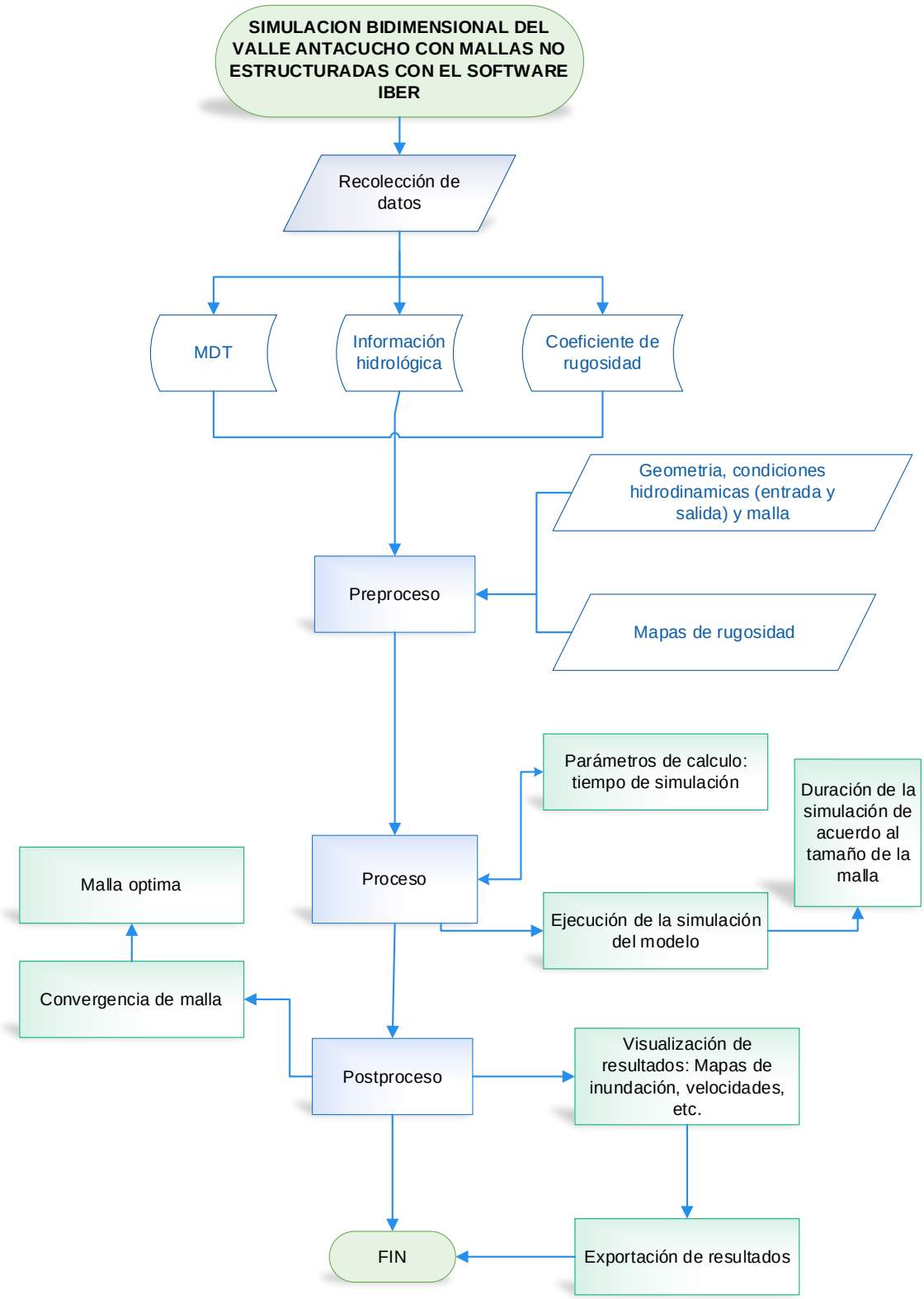
Para efectuar las simulaciones en IBER, es necesario considerar tres etapas principales dentro del proceso de modelación.

- **Preproceso:** En esta etapa se importa la geometría correspondiente al área de estudio y se realiza su edición a partir de las elevaciones obtenidas del Modelo Digital del Terreno (MDT). Posteriormente, se incorporan las condiciones hidrodinámicas del modelo, definiendo los contornos de entrada y salida. En el contorno de entrada se asigna el caudal de máxima avenida mediante un hidrograma, y finalmente se incorporan los mapas de rugosidad para representar las características hidráulicas del terreno y del cauce.
- **Proceso:** Se ejecuta el cálculo de la simulación del modelo.
- **Postproceso:** Se visualiza los mapas de velocidades máximas y áreas de inundación.

Para un mejor entendimiento se elaboró un flujograma de la simulación.

Figura 24

Diagrama de metodología para mallas no estructuradas



Nota. Se muestra el diagrama o pasos a seguir para la simulación en software IBER.

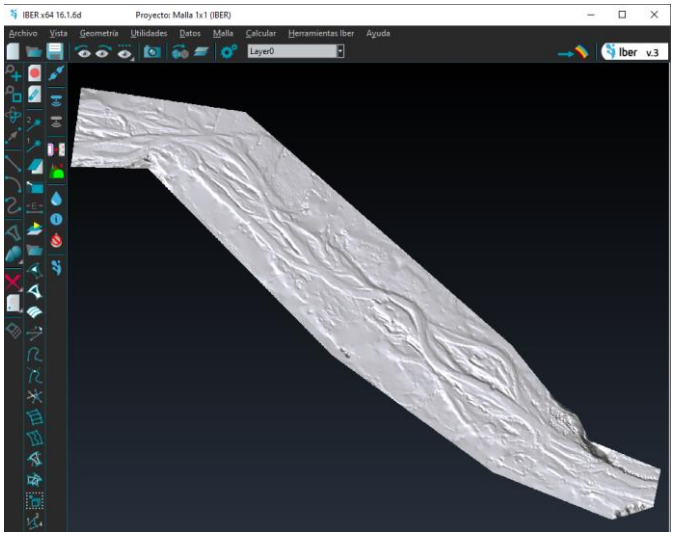
2.6.5.3. Preproceso

Para el proceso de simulación en IBER, es necesario incorporar el área de estudio y el Modelo Digital del Terreno (MDT). Para ello, se delimitó previamente el área de estudio utilizando el ortomosaico obtenido del levantamiento topográfico, el cual fue procesado y digitalizado mediante el programa ArcGIS versión 10.8, generándose en formato

Posteriormente, se generó la malla no estructurada sobre la geometría exportada del área de estudio. Para el presente proyecto, se consideraron tamaños de malla de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m y 5 m, con la finalidad de evaluar la influencia de la resolución de la malla en los resultados de la simulación hidráulica.

Para editar la malla con las elevaciones, el programa IBER solo acepta archivos en formato ASCII (.asc). Para ello se utilizó el programa QGIS 3.44.9 con la herramienta convertir formato. Esta herramienta permitió convertir los archivos de TIFF a formato ASCII en coordenadas proyectadas Project CRS: EPSG:32718 – WGS 84/ UTM zona 18s, se realizó la exportación de MDT de 1, 2, 3, 4 y 5 m.

Figura 25
Geometría del área de estudio



Nota. Se muestra la geometría en vista smooth de IBER

Para el presente proyecto se realizó cinco tipos de mallas, con el cual se simulo el caudal de 749 m^3/s, en la tabla 11 se muestra el tamaño de malla no estructurada y número de elementos generados.

Tabla 11
Tamaño de malla y número de elementos

Tamaño de malla	Número de elementos
1x1	1,360,887
2x2	339,237
3x3	150,461
4x4	84,364
5x5	53,999

Para asignar el caudal total, utilizando en el régimen crítico/subcrítico, para el caudal se tiene el caudal de máxima avenida 749 m^3/s, se introducirá mediante un hidrograma para ver la variación del flujo con un comportamiento más realista. Las condiciones de entrada se asignan utilizando la función “Assing”. De la misma forma se asignó las condiciones de salida se asignó en régimen subcrítico/critico

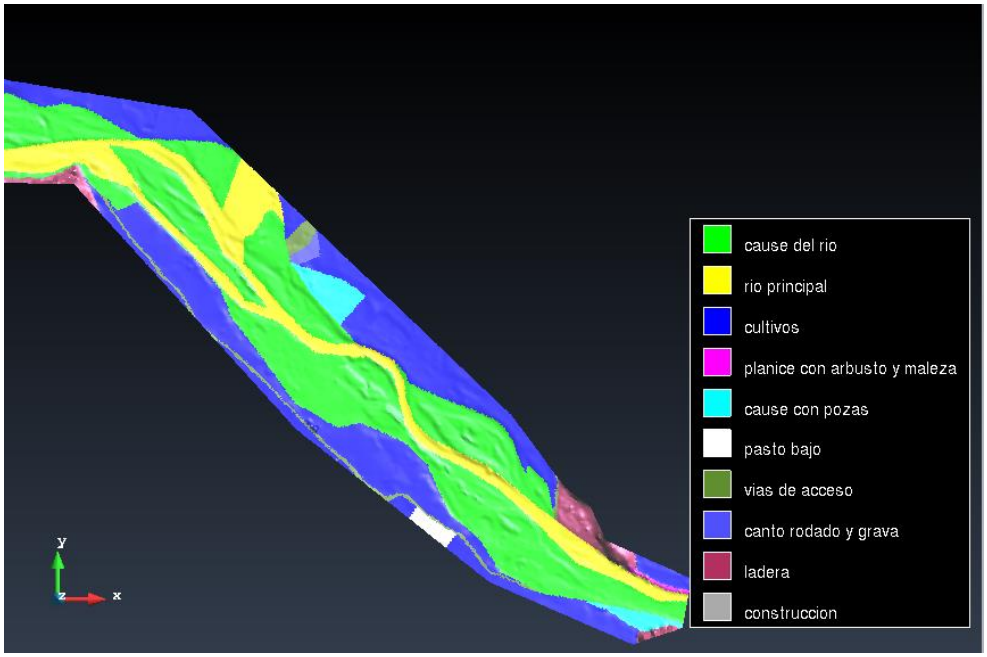
En IBER, la rugosidad hidráulica se representa mediante el coeficiente “*n*” de Manning. Para incorporar estos valores al modelo existen dos alternativas. La primera consiste en utilizar la opción “Land Use”, la cual permite definir distintos tipos de cobertura o uso de suelo y asignarlos a los elementos de la geometría. La segunda alternativa es mediante la elaboración de un mapa de rugosidades, que posteriormente se asigna de manera automática a la malla generada del modelo. En el presente estudio se optó por esta última metodología, debido a que permite una distribución más detallada y uniforme de los coeficientes de rugosidad en el área de simulación.

Según (GEASIG, 2018) para asignar automáticamente la rugosidad en IBER, se requiere realizar los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Crear un archivo en formato ASCII (.asc) con los identificadores asociados a los diferentes valores de rugosidad.
- **Paso 2:** realizar un achivo (.cv) que contenga el nombre del tipo de uso de suelo, con su respectivo identificador.
- **Paso 3:** Ingresar los tipos de uso de suelo en la base de datos de IBER.
- **Paso 4:** Asignar automáticamente sobre la malla con la herramienta “Automatic Assignation”.

Para la asignación automática de la rugosidad en la malla no estructurada creada, se debe ir a “Datos” luego a “Rugosidad” y seleccionar “Asignación automática”. En la ventana emergente se selecciona el archivo .txt y se hace clic en abrir.

Figura 26
Usos de suelo asignado en IBER



2.6.5.4. Proceso

Una vez culminada la etapa de preproceso, se procede con la ejecución del modelo y la resolución de las ecuaciones hidráulicas, etapa conocida como fase de procesamiento. Para desarrollar esta fase, es necesario considerar las capacidades del hardware del equipo utilizado en la simulación, así como los esquemas numéricos empleados para la resolución de las ecuaciones y los parámetros definidos para el correcto funcionamiento del modelo.

2.6.5.4.1. Hardware empleado.

Para la simulación se utilizó una computadora cuyas características de hardware son:

Tabla 12
Características de la computadora

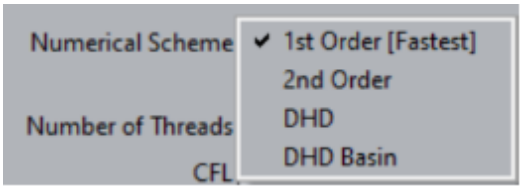
características de la computadora de simulación	
Procesador	Intel(R) Core(TM) i7-10700F CPU @ 2.90 GHz, 2.90 GHz
Núcleos	8
Procesadores lógicos	16
RAM instalada	16 GB
RAM Utilizable	15.9 GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650 (4 GB)

2.6.5.4.2. Esquemas numéricos de simulación.

Según Chavez (2024) Se explica que el esquema de primer orden ofrece una resolución más rápida y una mayor estabilidad, pero a costa de una menor precisión. Por otro lado, el esquema de segundo orden es menos estable, pero proporciona una mayor precisión y robustez. Los esquemas DHD y DHD Basin se emplean específicamente para análisis hidrológicos.

Para la simulación del proyecto se utilizó el esquema de primer orden (rápido), ya que se busca la estabilidad del modelo, influencia del MDT y no se requiere un enfoque hidrológico.

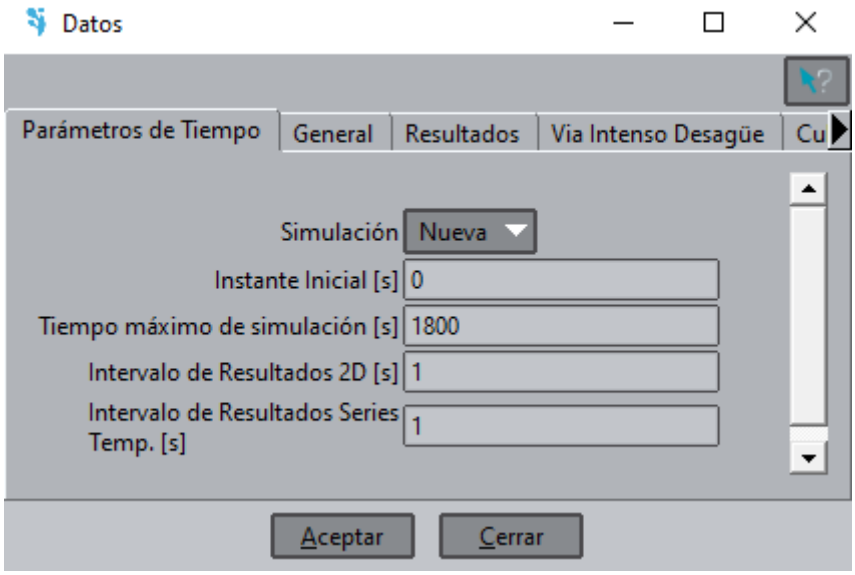
Figura 27
Esquema Numérico Seleccionado



2.6.5.4.3. Parámetros de Simulación

En este apartado, el parámetro principal corresponde al tiempo de simulación. Para el presente estudio, se estableció un tiempo inicial de cero segundos y un tiempo máximo de 1800 segundos, considerando que este intervalo permite garantizar la continuidad del flujo hasta la salida del caudal en el área de estudio. Asimismo, los resultados serán registrados cada segundo, con la finalidad de realizar un monitoreo continuo y detallado del comportamiento hidráulico durante la simulación.

Figura 28
Parámetros de Tiempo en IBER

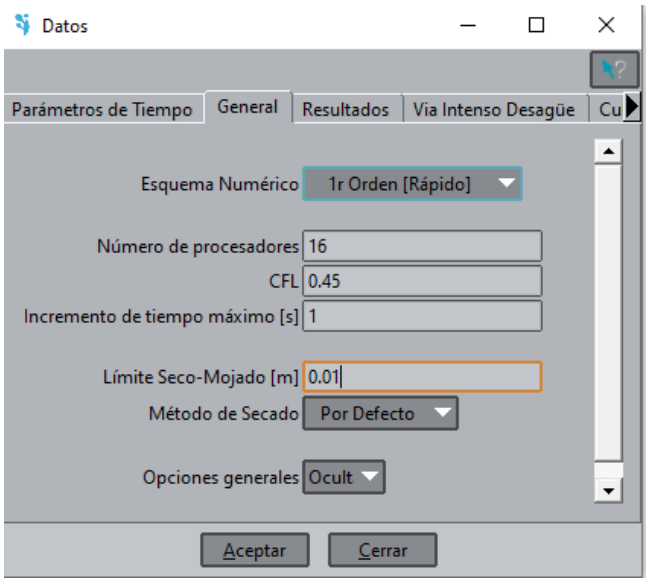


IBER utiliza el método de volúmenes finitos para la discretización espacial y un esquema explícito para la integración temporal (Bladé et al., 2014). En este enfoque, la solución hidráulica para cada intervalo de tiempo se obtiene a partir de los valores calculados en el paso anterior. Sin embargo, cuando el paso de tiempo es demasiado grande pueden generarse problemas de inestabilidad numérica en la simulación. Por ello, se utiliza el número de Courant, el cual permite controlar y limitar el paso de tiempo empleado por el programa durante la integración temporal de las ecuaciones, garantizando así la estabilidad y confiabilidad de los resultados.

Según Chavez (2024) el valor recomendado por IBER para el CFL es de 0.4 a 0.45. Además, en el estudio realizado por (Zapata Escudero, 2022) también se utilizó un valor de 0.45 para el CFL en la simulación. Por otro lado (Gomes & Garcia, 2012) probaron valores de 0.25, 0.5 y 0.75 para mallas regulares de elementos triangulares, obteniendo los mejores resultados con un valor de 0.5.

Tomando en consideración estas referencias, se optó por mantener el valor predeterminado de 0.45 asignado por IBER para el número de Courant durante las simulaciones. Del mismo modo, se estableció el número de procesadores en 16 y se conservaron los demás parámetros predeterminados establecidos por el programa.

Figura 29
Parámetros Generales en IBER

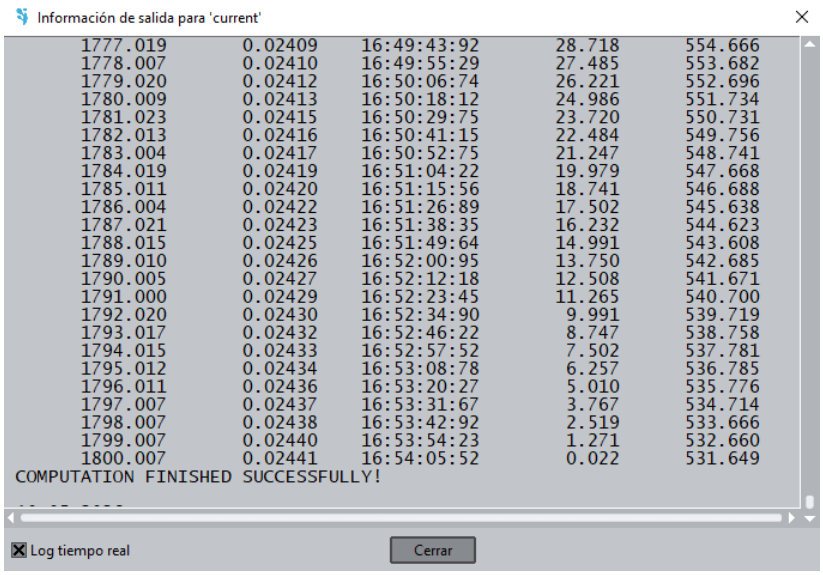


2.6.5.4.4. Cálculo de la simulación

Se procede a ejecutar el modelo desde la pestaña “Calculo”. Asimismo, mediante la herramienta “Ver información de proceso”, es posible visualizar el avance de la simulación, cuyo tiempo de ejecución dependerá de la cantidad de elementos considerados en el modelo.

Al finalizar nos muestra la pantalla de resultados con el tiempo de ejecución de inicio a fin y los caudales de salida e ingreso.

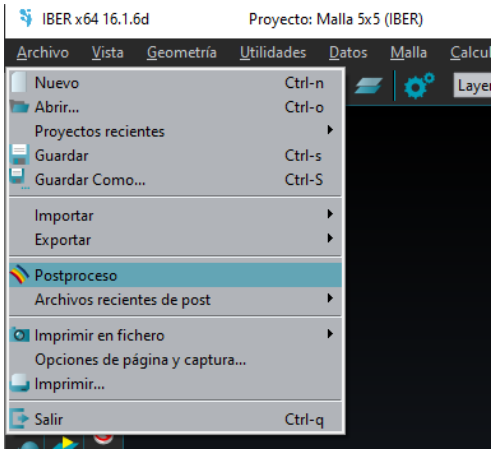
Figura 30
Proceso de simulación en IBER



2.6.5.5. Post-proceso

Una terminando el cálculo se accede al interfaz de postproceso en el cual se puede visualizar los resultados de calado y velocidad y exportar los resultados.

Figura 31
Post-proceso en IBER



2.6.6. Análisis de convergencia de malla

El análisis de convergencia se realizó mediante el Índice de Convergencia de Malla (GCI), la relación de convergencia asintótica y el orden observado de convergencia (p), siguiendo el procedimiento propuesto por (Roache, 1998).

Para este cálculo se considerarán los valores máximos de debido a que los valores mínimos se mantienen constantes en las simulaciones realizadas con mallas estructuradas y no estructuradas. El análisis se llevará a cabo utilizando las mallas de 1×1 m, 2×2 m y 3×3 m, debido a que presentan un comportamiento de convergencia adecuado. Por el contrario, las mallas de 4×4 m y 5×5 m no serán consideradas, ya que muestran resultados más alejados respecto a las mallas más refinadas y presentan órdenes de convergencia fuera del rango aceptable.

Para el cálculo se tiene que seguir los siguientes pasos y se deben usar las siguientes ecuaciones:

- Para el cálculo de razón de refinamiento se usa la (Ec. 14,15).
- Para el cálculo de orden de convergencia se usa la (Ec. 13).
- Para el cálculo de índice de convergencia de malla se usa la (Ec. 17).

- Y por último se tiene el valor de convergencia de malla mediante los GCI se usa la ecuación (Ec. 19).

Los cálculos se realizarán utilizando los resultados obtenidos de los modelos con mallas estructuradas y no estructuradas. A partir de este análisis, se evaluará la convergencia de las soluciones y se determinará la confiabilidad y estabilidad numérica de los modelos desarrollados.

2.6.7. Análisis de costos incrementales computacionales

Como último paso, se calculará el costo computacional, expresado como el porcentaje de incremento entre los diferentes refinamientos de malla, con el fin de identificar la malla más eficiente en términos de precisión y demanda computacional. Para ello, se utilizará la ecuación (Ec. 20).

Este análisis permitió evaluar el incremento relativo del esfuerzo computacional asociado al refinamiento progresivo de la malla.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Elaboración de modelos hidráulicos

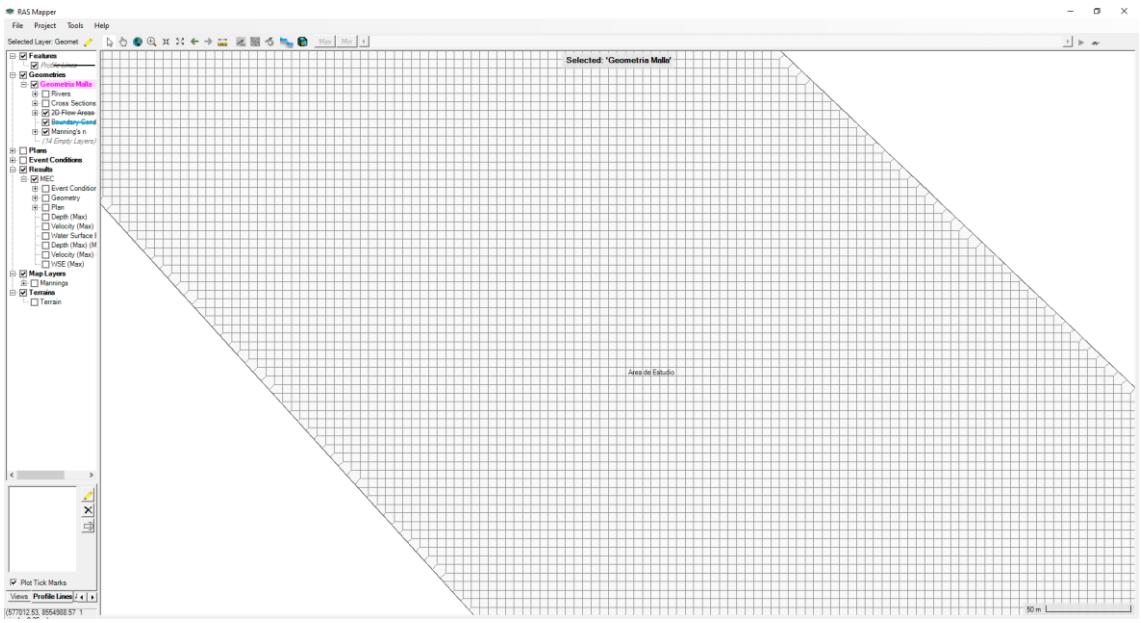
3.1.1. Malla estructurada en HEC-RAS

El programa HEC-RAS se creó la geometría en el área de estudio de 0.59 km^2 con malla estructurada de 1x1, 2x2, 3x3, 4x4 y 5x5.

En la tabla 8 se tiene que la cantidad de elementos de mallas generadas en el área de estudio, es inversamente proporcional con el tamaño de la malla, mientras el tamaño de la malla sea menor, mayor es el número de elementos de malla generado.

La diferencia entre el número de elementos de la malla 1x1 y malla 5x5 es de 567,285 elementos, esto significa que la malla 1x1 representa con mayor detalle la geometría del terreno que la malla 5x5.

Figura 32
Malla estructurada



Nota: Se muestra una malla 5x5 estructurada en el terreno, esta se ira refinando hasta llegar a la malla 1x1.

3.1.2. Malla no estructurada en IBER.

En el programa IBER se creó la geometría en el área de estudio de 0.59 km^2 con malla no estructurada de 1x1m, 2x2m, 3x3m, 4x4m y 5x5m.

En la tabla 11 se observa que el número de elementos generados en el programa IBER varía considerablemente según el tamaño de malla utilizado. Para la malla de 1×1 m se generaron 1,360,887 elementos, mientras que para la malla de 5×5 m únicamente se obtuvieron 53,999 elementos. Esta diferencia se debe a que, al emplear tamaños de malla menores, el área de estudio se discretiza en una mayor cantidad de elementos triangulares, permitiendo una representación más detallada de la geometría y del terreno.

En las figuras 33,34 y 35 muestra los detalles de la topografía.

Figura 33
Malla no estructurada 1x1

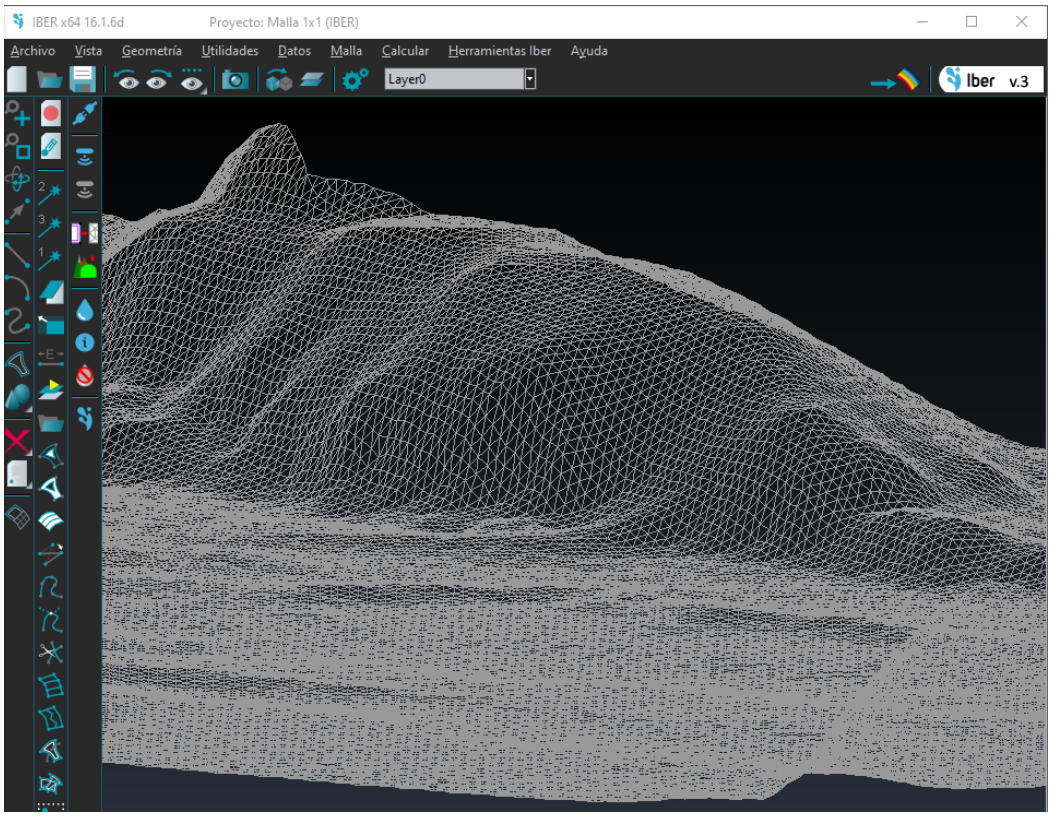


Figura 34
Malla no estructurada 3x3

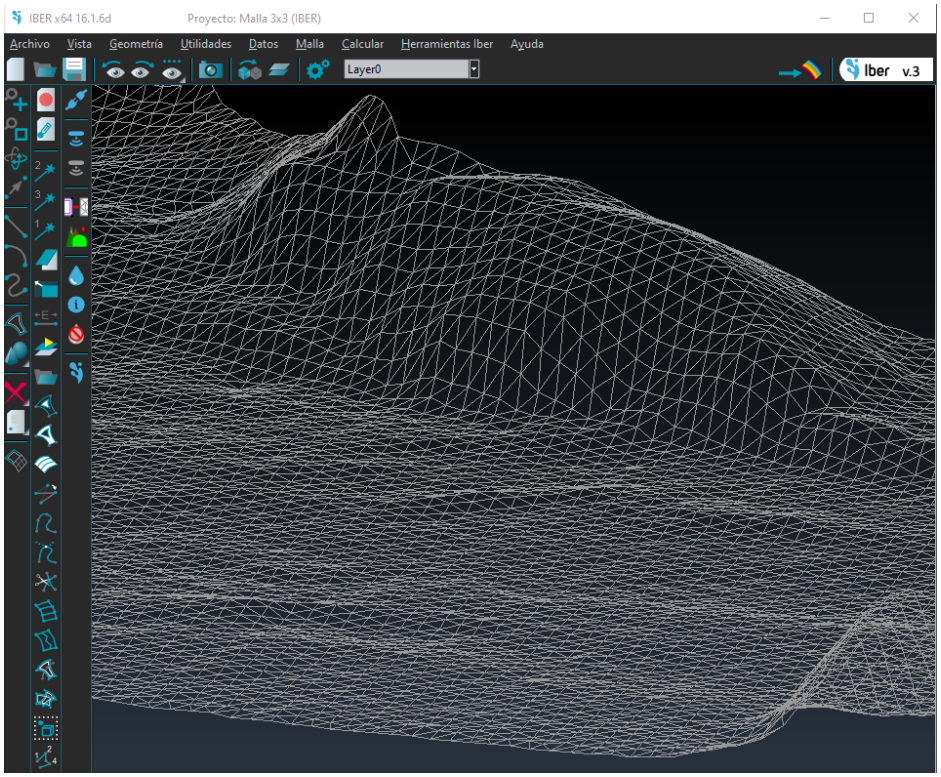
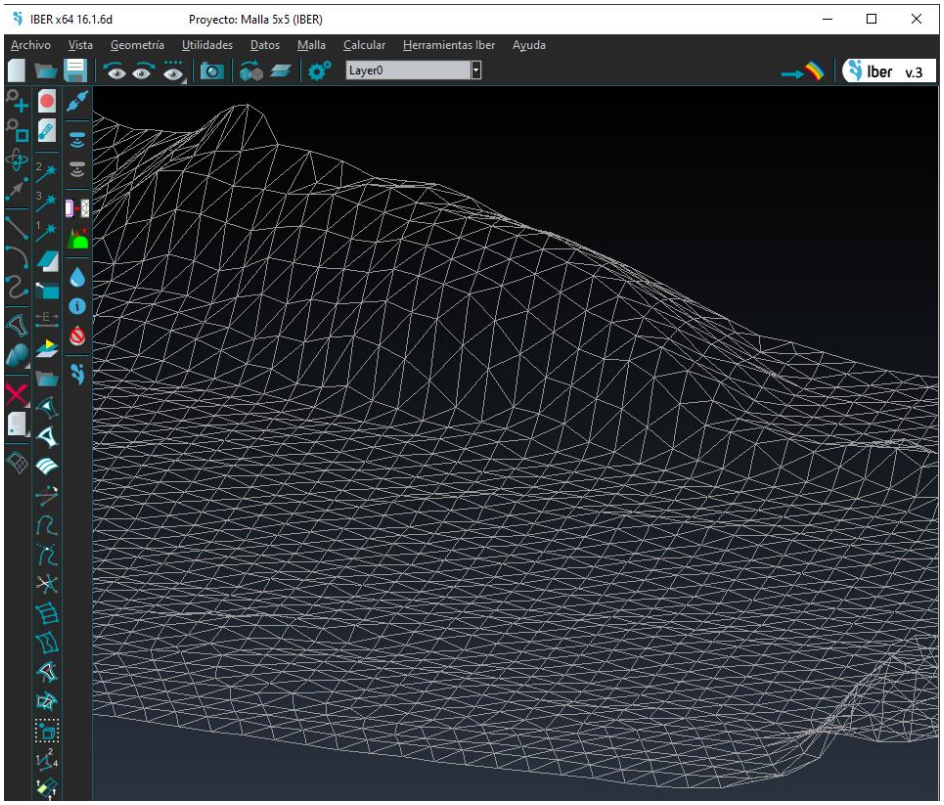


Figura 35
Malla no estructurada 5x5



3.2. Resultados Hidráulicos de las simulaciones

3.2.1. Resultados de mallas estructuradas - HEC-RAS

Se muestran los resultados de valores máximos, mínimos y promedio de todo el modelo.

Tabla 13
Resultados de calado en mallas estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Calado máximo (m)	Calado mínimo (m)	Calado promedio (m)
1	1x1	HR1-M1x1	4.36	0.00098	2.18
	2x2	HR1-M2x2	4.40	0.00098	2.20
	3x3	HR1-M3x3	4.50	0.00098	2.25
	4x4	HR1-M4x4	4.58	0.00098	2.29
	5x5	HR1-M5x5	4.62	0.00098	2.31
2	1x1	HR2-M1x1	4.11	0.00098	2.05
	2x2	HR2-M2x2	4.17	0.00098	2.09
	3x3	HR2-M3x3	4.27	0.00098	2.14
	4x4	HR2-M4x4	4.36	0.00098	2.18
	5x5	HR2-M5x5	4.39	0.00098	2.20
3	1x1	HR3-M1x1	4.06	0.00098	2.03
	2x2	HR3-M2x2	4.11	0.00098	2.06
	3x3	HR3-M3x3	4.22	0.00098	2.11
	4x4	HR3-M4x4	4.24	0.00098	2.12
	5x5	HR3-M5x5	4.26	0.00098	2.13
4	1x1	HR4-M1x1	4.00	0.00098	2.00
	2x2	HR4-M2x2	4.03	0.00098	2.01
	3x3	HR4-M3x3	4.11	0.00098	2.05
	4x4	HR4-M4x4	4.14	0.00098	2.07
	5x5	HR4-M5x5	4.11	0.00098	2.06
5	1x1	HR5-M1x1	3.95	0.00098	1.97
	2x2	HR5-M2x2	3.96	0.00098	1.98
	3x3	HR5-M3x3	4.04	0.00098	2.02
	4x4	HR5-M4x4	4.07	0.00098	2.04
	5x5	HR5-M5x5	4.06	0.00098	2.03

Nota. Se muestra el calado en m en los diferentes escenarios.

De la tabla 13 los resultados de las simulaciones hidráulicas en mallas estructuradas muestran que los valores de calado máximo y promedio presentan una tendencia general de incremento conforme aumenta la malla, y el calado mínimo permanece constante en todos los escenarios, de la misma forma se observa una tendencia similar en incrementos menos pronunciados al aumento de la resolución del MDT de 5m a 1m. Según Horritt & Bates (2001) indican que las mallas más gruesas pueden alterar la representación de la conectividad hidráulica y producir variaciones en los niveles de inundación debido a la pérdida de detalle topográfico.

Tabla 14

Resultados de velocidad en mallas estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
1	1x1	HR1-M1x1	21.60	0.00019	10.80
	2x2	HR1-M2x2	12.85	0.00286	6.42
	3x3	HR1-M3x3	9.84	0.00256	4.92
	4x4	HR1-M4x4	9.08	0.00135	4.54
	5x5	HR1-M5x5	8.86	0.00240	4.43
2	1x1	HR2-M1x1	21.42	0.00127	10.71
	2x2	HR2-M2x2	13.67	0.00140	6.84
	3x3	HR2-M3x3	9.54	0.00058	4.77
	4x4	HR2-M4x4	8.83	0.00295	4.42
	5x5	HR2-M5x5	8.87	0.00301	4.44
3	1x1	HR3-M1x1	20.91	0.00198	10.46
	2x2	HR3-M2x2	13.46	0.00071	6.73
	3x3	HR3-M3x3	9.78	0.00303	4.89
	4x4	HR3-M4x4	8.83	0.00163	4.42
	5x5	HR3-M5x5	8.94	0.00204	4.47
4	1x1	HR4-M1x1	20.93	0.00464	10.47
	2x2	HR4-M2x2	12.73	0.00213	6.37
	3x3	HR4-M3x3	10.19	0.00193	5.10
	4x4	HR4-M4x4	9.16	0.00206	4.58
	5x5	HR4-M5x5	8.89	0.00297	4.45
5	1x1	HR5-M1x1	16.88	0.00245	8.44
	2x2	HR5-M2x2	12.73	0.00418	6.37
	3x3	HR5-M3x3	8.75	0.00138	4.38
	4x4	HR5-M4x4	9.41	0.00304	4.71
	5x5	HR5-M5x5	8.56	0.00085	4.28

Nota. Se muestra la velocidad en m/s en los diferentes escenarios.

De la tabla 14 los resultados de las simulaciones hidráulicas en mallas estructuradas muestran que los valores de velocidades máximas y promedio presentan una tendencia

decreciente conforme aumenta la malla, y las velocidades mínimas presentan variaciones reducidas, este comportamiento se repite en todos los MDT analizados.

Según Horritt & Bates (2001) señalan que la resolución espacial influye significativamente en la representación de los procesos hidráulicos, especialmente en la estimación de velocidades y patrones de circulación del flujo.

Tabla 15
Resultados de área inundada en mallas estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Área Inundada (ha)
1	1x1	HR1-M1x1	35.49
	2x2	HR1-M2x2	35.05
	3x3	HR1-M3x3	35.3
	4x4	HR1-M4x4	35.35
	5x5	HR1-M5x5	35.2
2	1x1	HR2-M1x1	35.45
	2x2	HR2-M2x2	35.04
	3x3	HR2-M3x3	35.24
	4x4	HR2-M4x4	35.29
	5x5	HR2-M5x5	35.15
3	1x1	HR3-M1x1	35.43
	2x2	HR3-M2x2	34.93
	3x3	HR3-M3x3	35.48
	4x4	HR3-M4x4	35.19
	5x5	HR3-M5x5	35.12
4	1x1	HR4-M1x1	35.39
	2x2	HR4-M2x2	34.87
	3x3	HR4-M3x3	35.15
	4x4	HR4-M4x4	35.16
	5x5	HR4-M5x5	35.03
5	1x1	HR5-M1x1	35.48
	2x2	HR5-M2x2	35.04
	3x3	HR5-M3x3	35.18
	4x4	HR5-M4x4	35.24
	5x5	HR5-M5x5	69.94

Nota. Se muestra el área inundada en los diferentes escenarios

De la tabla 15 los resultados de área inundada permanecen constante en la mayoría de los escenarios evaluados, la diferencia entre tamaños de malla y resolución de MDT son mínimas lo cual indica una baja sensibilidad de esta variable. (Cook & Merwade, 2009)

señalan que la influencia de la resolución espacial sobre el área inundada es generalmente menor que sobre las velocidades y profundidades, debido a que la extensión de la inundación depende principalmente de la topografía global y del volumen de agua disponible, mientras que las variables hidráulicas locales responden con mayor sensibilidad a los cambios en la discretización.

Los mapas del calado y la velocidad se encuentran adjuntados en el anexo a su vez estas representan el área de inundación.

3.2.2. Resultados de mallas no estructuradas – IBER

Tabla 16

Resultados de calado en mallas no estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Calado máximo (m)	Calado mínimo (m)	Calado promedio (m)
1	1x1	IR1-M1x1	4.34	0.01000	2.18
	2x2	IR1-M2x2	4.08	0.01000	2.05
	3x3	IR1-M3x3	4.00	0.01000	2.00
	4x4	IR1-M4x4	4.03	0.01000	2.02
	5x5	IR1-M5x5	3.84	0.01000	1.93
2	1x1	IR2-M1x1	4.28	0.01000	2.14
	2x2	IR2-M2x2	4.15	0.01000	2.08
	3x3	IR2-M3x3	3.97	0.01000	1.99
	4x4	IR2-M4x4	4.00	0.01000	2.01
	5x5	IR2-M5x5	3.81	0.01000	1.91
3	1x1	IR3-M1x1	4.25	0.01000	2.13
	2x2	IR3-M2x2	4.15	0.01000	2.08
	3x3	IR3-M3x3	3.96	0.01000	1.99
	4x4	IR3-M4x4	3.95	0.01000	1.98
	5x5	IR3-M5x5	3.80	0.01003	1.91
4	1x1	IR4-M1x1	4.22	0.01000	2.11
	2x2	IR4-M2x2	4.18	0.01000	2.09
	3x3	IR4-M3x3	4.05	0.01000	2.03
	4x4	IR4-M4x4	3.92	0.01000	1.97
	5x5	IR4-M5x5	3.84	0.01000	1.93
5	1x1	IR5-M1x1	4.23	0.01000	2.12
	2x2	IR5-M2x2	4.08	0.01000	2.04
	3x3	IR5-M3x3	3.98	0.01000	2.00
	4x4	IR5-M4x4	3.86	0.01000	1.94
	5x5	IR5-M5x5	3.79	0.01000	1.90

Nota. Se muestra el calado en m en los diferentes escenarios.

De la tabla 16 los resultados de calado máximo y promedio se tiene una tendencia general de disminución conforme aumenta el tamaño de malla y los calados mínimos se mantienen constantes en todos los escenarios, asimismo las diferencia entre MDT son pequeñas en comparación con las variaciones de tamaño de malla.

Esto se debe a que al aumentar la el tamaño de malla se simplifica la geometría y se pierde el detalle topográfico lo cual confirma lo mencionado por Cook & Merwade (2009), quienes indican que la resolución espacial del modelo influye directamente en la representación de las características topográficas responsables de controlar la acumulación y distribución del agua.

Tabla 17

Resultados de velocidad en mallas no estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
1	1x1	IR1-M1x1	8.63	0.00266	4.32
	2x2	IR1-M2x2	8.72	0.00382	4.36
	3x3	IR1-M3x3	8.75	0.00948	4.38
	4x4	IR1-M4x4	13.76	0.00267	6.88
	5x5	IR1-M5x5	13.13	0.00460	6.57
2	1x1	IR2-M1x1	9.06	0.00245	4.53
	2x2	IR2-M2x2	9.83	0.00244	4.92
	3x3	IR2-M3x3	11.40	0.00256	5.70
	4x4	IR2-M4x4	13.33	0.00267	6.66
	5x5	IR2-M5x5	14.79	0.00264	7.40
3	1x1	IR3-M1x1	9.10	0.00244	4.55
	2x2	IR3-M2x2	9.12	0.00246	4.56
	3x3	IR3-M3x3	10.38	0.00251	5.19
	4x4	IR3-M4x4	11.57	0.00279	5.79
	5x5	IR3-M5x5	13.84	0.00374	6.92
4	1x1	IR4-M1x1	9.14	0.00243	4.57
	2x2	IR4-M2x2	8.84	0.00245	4.42
	3x3	IR4-M3x3	10.02	0.00243	5.01
	4x4	IR4-M4x4	10.69	0.00253	5.35
	5x5	IR4-M5x5	16.89	0.00278	8.45
5	1x1	IR5-M1x1	9.06	0.00240	4.53
	2x2	IR5-M2x2	8.83	0.00234	4.42
	3x3	IR5-M3x3	11.21	0.00245	5.61
	4x4	IR5-M4x4	9.27	0.00178	4.64
	5x5	IR5-M5x5	18.60	0.00249	9.30

Nota. Se muestra la velocidad en m/s en los diferentes escenarios.

De la tabla 17 los resultados de las simulaciones hidráulicas en mallas no estructuradas muestran que los valores de velocidades máximas y promedio presentan una tendencia general de incremento conforme aumenta la malla, y las velocidades mínimas permanecen constantes en todos los escenarios, para los MDT varia de la misma forma, pero en variaciones mínimas. Esto se debe a que la resolución espacial tiene una influencia significativa en la simulación de velocidades debido a la sensibilidad de esta variable frente a las modificaciones en la geometría y pendiente del terreno (Horritt & Bates, 2001).

Tabla 18

Resultados de área inundada en mallas no estructuradas

MDT	Tamaño de malla	Código	Área Inundada (ha)
1	1x1	IR1-M1x1	38.41
	2x2	IR1-M2x2	38.19
	3x3	IR1-M3x3	38.5
	4x4	IR1-M4x4	39.18
	5x5	IR1-M5x5	38.95
2	1x1	IR2-M1x1	38.11
	2x2	IR2-M2x2	38.03
	3x3	IR2-M3x3	38.34
	4x4	IR2-M4x4	38.99
	5x5	IR2-M5x5	38.81
3	1x1	IR3-M1x1	37.8
	2x2	IR3-M2x2	37.86
	3x3	IR3-M3x3	38.1
	4x4	IR3-M4x4	38.88
	5x5	IR3-M5x5	38.77
4	1x1	IR4-M1x1	37.45
	2x2	IR4-M2x2	37.53
	3x3	IR4-M3x3	37.86
	4x4	IR4-M4x4	38.62
	5x5	IR4-M5x5	38.72
5	1x1	IR5-M1x1	37.34
	2x2	IR5-M2x2	37.47
	3x3	IR5-M3x3	37.73
	4x4	IR5-M4x4	38.57
	5x5	IR5-M5x5	38.54

Nota. Se muestra el área inundada en los diferentes escenarios

De la tabla 18 se tiene los resultados de área inundada lo cual presenta una tendencia general de incremento conforme va aumentando el tamaño de malla y al aumento de la resolución de MDT. Cook & Merwade (2009) menciona que las resoluciones más gruesas pueden generar sobreestimaciones de la extensión inundada al suavizar elementos topográficos que limitan lateralmente la expansión del flujo

Los mapas del calado y la velocidad se encuentran adjuntados en el anexo a su vez estas representan el área de inundación.

3.3. Evaluación de las características hidráulicas.

El GCI es una métrica ampliamente utilizada para evaluar la incertidumbre numérica asociada al refinamiento de malla y determinar si una solución se encuentra dentro de la región asintótica de convergencia propuesta por (Roache, 1998).

3.3.1. Análisis de convergencia del modelo en calado

Tabla 19
Índice de convergencia de mallas de calado en mallas estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Calado máximo (m)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	HR1-M1x1	1	4.36	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.61%**	4.36
	HR1-M2x2	2	4.40	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.68%**	
	HR1-M3x3	3	4.50	p_1-2	1.46	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR1-M4x4	4	4.58	p_2-3	2.50			
	HR1-M5x5	5	4.62					
2	HR2-M1x1	1	4.11	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.78%**	4.07
	HR2-M2x2	2	4.17	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**4.58%**	
	HR2-M3x3	3	4.27	p_1-2	0.74	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR2-M4x4	4	4.36	p_2-3	1.27			
	HR2-M5x5	5	4.39					
3	HR3-M1x1	1	4.06	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.19%**	4.05
	HR3-M2x2	2	4.11	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.61%**	
	HR3-M3x3	3	4.22	p_1-2	1.16	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR3-M4x4	4	4.24	p_2-3	1.97			
	HR3-M5x5	5	4.26					
4	HR4-M1x1	1	4.00	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.54%**	3.99
	HR4-M2x2	2	4.03	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.45%**	
	HR4-M3x3	3	4.11	p_1-2	1.44	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	HR4-M4x4	4	4.14	p_2-3	2.47			
	HR4-M5x5	5	4.11					

5	HR5-M1x1	1	3.95	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.04%**	3.95
	HR5-M2x2	2	3.96	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.34%**	
	HR5-M3x3	3	4.04	p_1-2	3.14	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.00**	
	HR5-M4x4	4	4.07	p_2-3	5.37			
	HR5-M5x5	5	4.06					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

En la tabla 19, las mallas estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica entre 0.99 y 1.00, indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los valores de GCI son bajos (0.04 %–4.58 %), lo que evidencia una reducida incertidumbre asociada al error de discretización. Los MDT de 1 m, 3 m y 4 m muestran un comportamiento de convergencia más consistente, mientras que el MDT de 5 m, aunque presenta bajos valores de GCI, registra órdenes aparentes de convergencia superiores a 3, por lo que sus resultados deben interpretarse con cautela.

Tabla 20

Índice de convergencia de mallas del calado en mallas no estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Calado máximo (m)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	IR1-M1x1	1	4.34	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**11.01%**	4.05
	IR1-M2x2	2	4.08	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**3.73%**	
	IR1-M3x3	3	4.00	p_1-2	-1.65	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.06**	
	IR1-M4x4	4	4.03	p_2-3	-2.82			
	IR1-M5x5	5	3.84					
2	IR2-M1x1	1	4.28	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**11.06%**	4.44
	IR2-M2x2	2	4.15	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**15.40%**	
	IR2-M3x3	3	3.97	p_1-2	0.43	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.03**	
	IR2-M4x4	4	4.00	p_2-3	0.74			
	IR2-M5x5	5	3.81					
3	IR3-M1x1	1	4.25	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.92%**	4.28
	IR3-M2x2	2	4.15	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**5.87%**	
	IR3-M3x3	3	3.96	p_1-2	0.98	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.02**	
	IR3-M4x4	4	3.95	p_2-3	1.67			
	IR3-M5x5	5	3.80					
4	IR4-M1x1	1	4.22	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.54%**	4.22
	IR4-M2x2	2	4.18	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.74%**	
	IR4-M3x3	3	4.05	p_1-2	1.68		**1.01**	

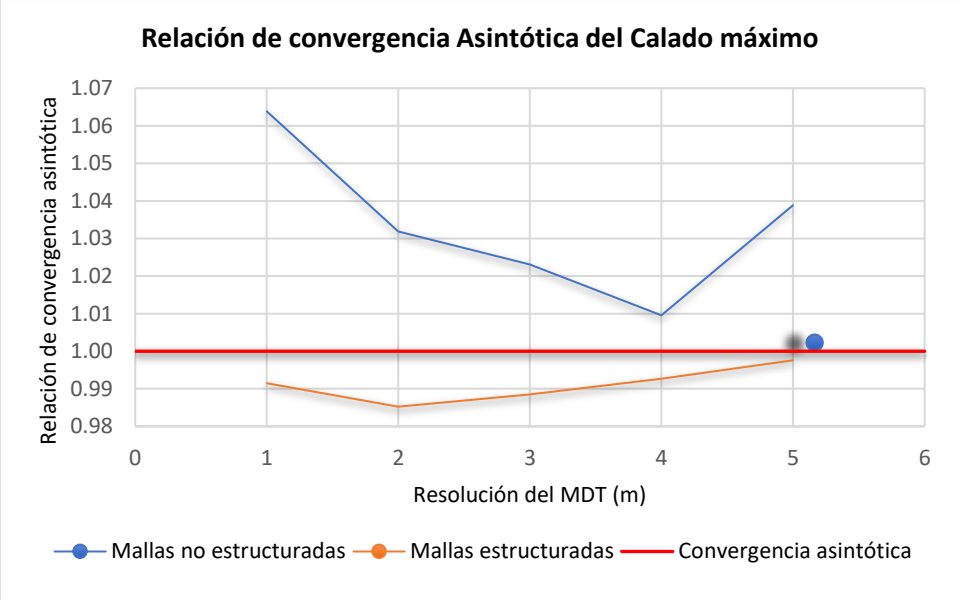
	IR4-M4x4	4	3.92	p_2-3	2.87	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR4-M5x5	5	3.84					
5	IR5-M1x1	1	4.23	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**11.46%**	3.99
	IR5-M2x2	2	4.08	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**7.05%**	
	IR5-M3x3	3	3.98	p_1-2	-0.76	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.04**	
	IR5-M4x4	4	3.86	p_2-3	-1.29			
	IR5-M5x5	5	3.79					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

En la tabla 20, las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica entre 1.01 y 1.06, indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. Los menores valores de GCI corresponden a los MDT de 3 m y 4 m, lo que evidencia una menor incertidumbre asociada al error de discretización. En contraste, los MDT de 1 m, 2 m y 5 m presentan mayores valores de GCI y órdenes aparentes de convergencia negativos o inferiores a la unidad, indicando un comportamiento de convergencia menos consistente y resultados que deben interpretarse con cautela.

Figura 36

Relación de convergencia asintótica de mallas de calado máximo



En la figura 36 se observa que la relación de convergencia asintótica de malla es próxima a la unidad, En las mallas estructuradas, los valores se mantienen entre 0.99 y 1.00 evidenciando un comportamiento uniforme durante el refinamiento de la malla. Por su parte las mallas no estructuradas presentan valores entre 1.01 y 1.06, siendo el MDT

de 4 m el más cercano a la unidad, según Roache (1998) una relación de convergencia asintótica cercana a la unidad indica que la solución se encuentra próxima al régimen de convergencia asintótica; adicionalmente, valores bajos del GCI evidencian una menor incertidumbre asociada al error de discretización.

3.3.2. Análisis de convergencia del modelo en velocidad

Este parámetro presenta una alta sensibilidad frente a las variaciones topográficas y a las diferentes resoluciones del MDT, debido a que pequeños cambios en la geometría del terreno pueden generar diferencias significativas en la distribución y magnitud de las velocidades simuladas.

Tabla 21

Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Velocidad Máxima (m/s)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	HR1-M1x1	1	21.60	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**77.10%**	11.68
	HR1-M2x2	2	12.85	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**44.47%**	
	HR1-M3x3	3	9.84	p_1-2	-1.54	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.68**	
	HR1-M4x4	4	9.08	p_2-3	-2.64			
	HR1-M5x5	5	8.86					
2	HR2-M1x1	1	21.42	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**97.03%**	10.58
	HR2-M2x2	2	13.67	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**81.19%**	
	HR2-M3x3	3	9.54	p_1-2	-0.90	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.57**	
	HR2-M4x4	4	8.83	p_2-3	-1.55			
	HR2-M5x5	5	8.87					
3	HR3-M1x1	1	20.91	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**88.03%**	11.05
	HR3-M2x2	2	13.46	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**67.54%**	
	HR3-M3x3	3	9.78	p_1-2	-1.02	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.55**	
	HR3-M4x4	4	8.83	p_2-3	-1.74			
	HR3-M5x5	5	8.94					
4	HR4-M1x1	1	20.93	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**70.89%**	11.86
	HR4-M2x2	2	12.73	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**36.06%**	
	HR4-M3x3	3	10.19	p_1-2	-1.69	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.64**	
	HR4-M4x4	4	9.16	p_2-3	-2.89			
	HR4-M5x5	5	8.89					
5	HR5-M1x1	1	16.88	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**713.72%**	-32.37
	HR5-M2x2	2	12.73	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**905.78%**	
	HR5-M3x3	3	8.75	p_1-2	-0.06	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.33**	
	HR5-M4x4	4	9.41	p_2-3	-0.11			
	HR5-M5x5	5	8.56					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 21, los resultados de la velocidad máxima en las mallas estructuradas muestran relaciones de convergencia asintótica entre 1.33 y 1.68, alejadas de la unidad, lo que indica que las soluciones no alcanzan el régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los valores de GCI son elevados, variando entre 36.06 % y 905.78 %, evidenciando una alta incertidumbre asociada al error de discretización y una marcada sensibilidad de la velocidad máxima al refinamiento de la malla. Adicionalmente, los órdenes aparentes de convergencia presentan valores negativos en todos los MDT, indicando un comportamiento de convergencia oscilatorio. El MDT de 5 m presenta el comportamiento más desfavorable, debido a sus elevados valores de GCI y a la obtención de una solución asintótica negativa, por lo que sus resultados deben interpretarse con cautela.

Tabla 22

Índice de convergencia de mallas de la velocidad mallas no estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Velocidad máxima (m/s)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	IR1-M1x1	1	8.63	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.87%**	8.73
	IR1-M2x2	2	8.72	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.65%**	
	IR1-M3x3	3	8.75	p_1-2	-1.52	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.99**	
	IR1-M4x4	4	13.76	p_2-3	-2.59			
	IR1-M5x5	5	13.13					
2	IR2-M1x1	1	9.06	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**10.58%**	8.80
	IR2-M2x2	2	9.83	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**19.63%**	
	IR2-M3x3	3	11.40	p_1-2	1.01	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**0.92**	
	IR2-M4x4	4	13.33	p_2-3	1.73			
	IR2-M5x5	5	14.79					
3	IR3-M1x1	1	9.10	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.00%**	9.10
	IR3-M2x2	2	9.12	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.28%**	
	IR3-M3x3	3	10.38	p_1-2	5.96	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.00**	
	IR3-M4x4	4	11.57	p_2-3	10.19			
	IR3-M5x5	5	13.84					
4	IR4-M1x1	1	9.14	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.43%**	9.16
	IR4-M2x2	2	8.84	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**5.76%**	
	IR4-M3x3	3	10.02	p_1-2	1.96	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.03**	
	IR4-M4x4	4	10.69	p_2-3	3.35			

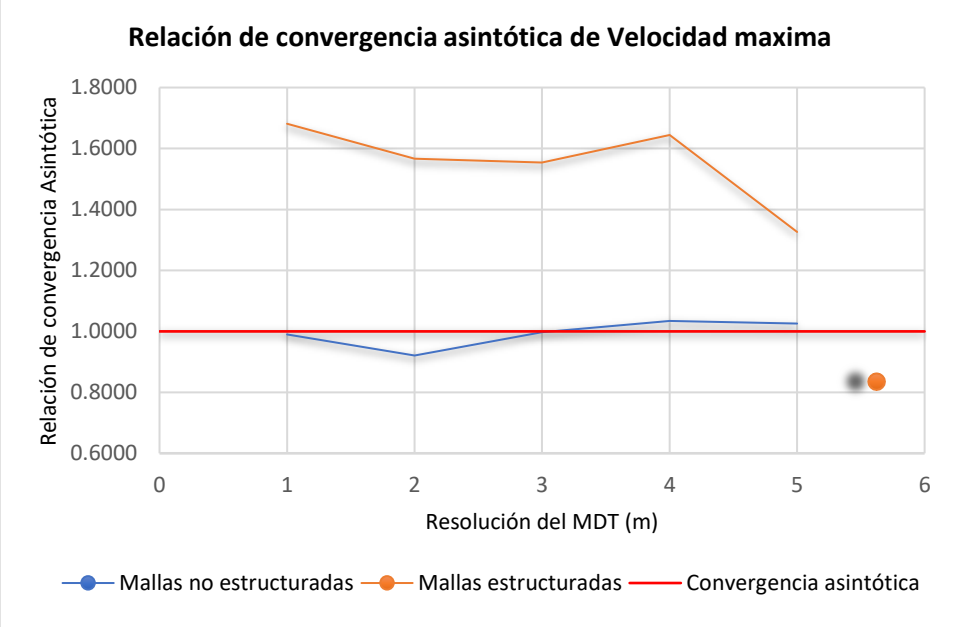
	IR4-M5x5	5	16.89					
5	IR5-M1x1	1	9.06	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.33%**	9.06
	IR5-M2x2	2	8.83	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**3.56%**	
	IR5-M3x3	3	11.21	p_1-2	3.39	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.03**	
	IR5-M4x4	4	9.27	p_2-3	5.80			
	IR5-M5x5	5	18.60					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 22, las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica entre 0.92 y 1.03, siendo los MDT de 1 m, 3 m, 4 m y 5 m los más cercanos a la unidad, lo que indica una mayor proximidad al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, estos MDT registran valores de GCI bajos, reflejando una menor incertidumbre asociada al error de discretización. En contraste, el MDT de 2 m presenta la relación de convergencia asintótica más alejada de la unidad (0.92) y los mayores valores de GCI (10.58 % y 19.63 %), evidenciando una mayor sensibilidad al refinamiento de la malla. Sin embargo, el análisis del orden aparente de convergencia muestra comportamientos atípicos en algunos MDT, por lo que los resultados deben interpretarse considerando conjuntamente todos los indicadores de convergencia.

Figura 37

Relación de convergencia asintótica de mallas de Velocidad máxima



De la figura 37 muestra que, para la velocidad máxima, las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica más cercanas a la unidad que las mallas estructuradas en la mayoría de los MDT evaluados. En particular, los MDT de 1 m y 3 m presentan valores próximos a 1, indicando una mayor proximidad al régimen de convergencia asintótica. En contraste, las mallas estructuradas registran relaciones entre 1.33 y 1.68, alejadas de la unidad, lo que evidencia un comportamiento de convergencia menos consistente para esta variable. Estos resultados indican que la velocidad máxima presenta una mayor sensibilidad al refinamiento de la malla en las mallas estructuradas que en las no estructuradas.

3.3.3. Análisis de convergencia del modelo en área de inundación.

Para el análisis de convergencia en mallas estructuradas se emplearon los resultados obtenidos del modelamiento hidráulico en HEC-RAS correspondientes al parámetro de Área de inundación.

Tabla 23
Índice de convergencia de mallas de área en mallas estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Área Inundada (ha)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	HR1-M1x1	1	35.49	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**3.62%**	34.84
	HR1-M2x2	2	35.05	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.08%**	
	HR1-M3x3	3	35.30	p_1-2	-0.82	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR1-M4x4	4	35.35	p_2-3	-1.40			
	HR1-M5x5	5	35.20					
2	HR2-M1x1	1	35.45	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.76%**	34.92
	HR2-M2x2	2	35.04	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**1.33%**	
	HR2-M3x3	3	35.24	p_1-2	-1.07	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR2-M4x4	4	35.29	p_2-3	-1.82			
	HR2-M5x5	5	35.15					
3	HR3-M1x1	1	35.43	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**16.25%**	37.61
	HR3-M2x2	2	34.93	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**18.25%**	
	HR3-M3x3	3	35.48	p_1-2	0.15	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR3-M4x4	4	35.19	p_2-3	0.25			
	HR3-M5x5	5	35.12					
4	HR4-M1x1	1	35.39	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**4.00%**	34.65

	HR4-M2x2	2	34.87	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.19%**	
	HR4-M3x3	3	35.15	p_1-2	-0.89			
	HR4-M4x4	4	35.16	p_2-3	-1.52	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR4-M5x5	5	35.03					
5	HR5-M1x1	1	35.48	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**2.26%**	34.99
	HR5-M2x2	2	35.04	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.71%**	
	HR5-M3x3	3	35.18	p_1-2	-1.69			
	HR5-M4x4	4	35.24	p_2-3	-2.88	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	HR5-M5x5	5	69.94					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 23, las mallas estructuradas presentan una relación de convergencia asintótica cercana a la unidad (≈1.01) para todos los MDT evaluados, indicando que las soluciones se aproximan al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los MDT de 1 m, 2 m, 4 m y 5 m presentan valores bajos de GCI, lo que evidencia una menor incertidumbre asociada al error de discretización. En contraste, el MDT de 3 m registra los mayores valores de GCI, indicando una mayor sensibilidad al refinamiento de la malla. Adicionalmente, la malla 5×5 del MDT de 5 m presenta un incremento considerable del área inundada (69.94 ha), comportamiento que puede atribuirse a la pérdida de detalle topográfico causada por el uso de una malla más gruesa, la cual reduce la capacidad de representar adecuadamente el relieve y modifica la delimitación de la inundación.

Tabla 24

Índice de convergencia de mallas de área en mallas no estructuradas

MDT (m)	Código	Malla	Área Inundada (ha)	Orden de convergencia de malla		Índice de convergencia (GCI)		Solución asintótica fh0
1	IR1-M1x1	1	38.41	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**1.65%**	38.62
	IR1-M2x2	2	38.19	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**2.37%**	
	IR1-M3x3	3	38.50	p_1-2	0.52			
	IR1-M4x4	4	39.18	p_2-3	0.88	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.01**	
	IR1-M5x5	5	38.95					
2	IR2-M1x1	1	38.11	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.11%**	38.12
	IR2-M2x2	2	38.03	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.40%**	
	IR2-M3x3	3	38.34	p_1-2	1.83			
	IR2-M4x4	4	38.99	p_2-3	3.12	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$	**1.00**	
	IR2-M5x5	5	38.81					

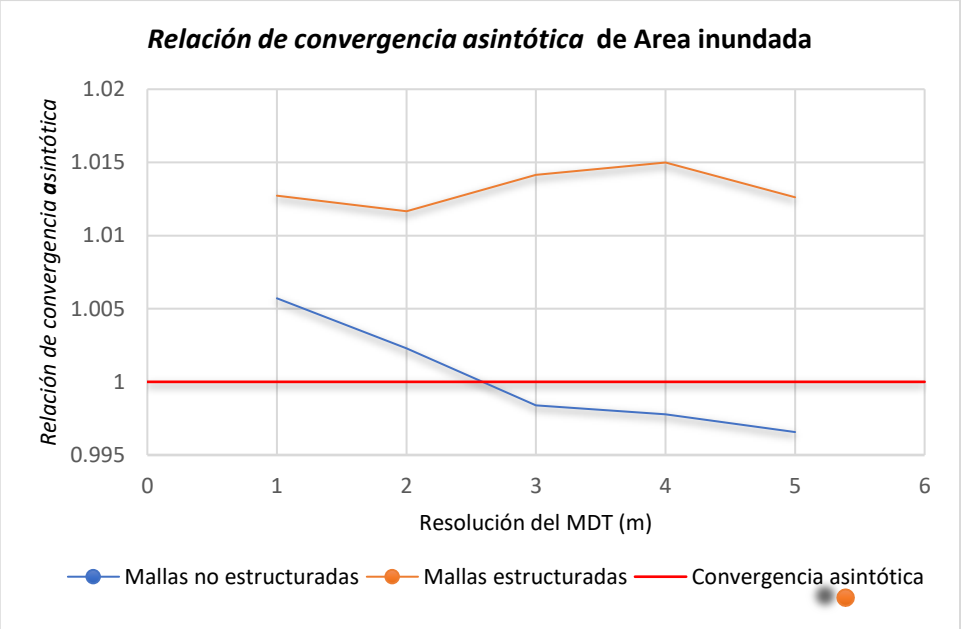
3	IR3-M1x1	1	37.80	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.07%**	37.79
	IR3-M2x2	2	37.86	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.27%**	
	IR3-M3x3	3	38.10	p_1-2	1.96	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR3-M4x4	4	38.88	p_2-3	3.36		**1.00**	
	IR3-M5x5	5	38.77					
4	IR4-M1x1	1	37.45	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.09%**	37.45
	IR4-M2x2	2	37.53	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.37%**	
	IR4-M3x3	3	37.86	p_1-2	1.99	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR4-M4x4	4	38.62	p_2-3	3.39		**1.00**	
	IR4-M5x5	5	38.72					
5	IR5-M1x1	1	37.34	r_1-2	2.00	GCI_1-2	**0.41%**	37.30
	IR5-M2x2	2	37.47	r_2-3	1.50	GCI_2-3	**0.84%**	
	IR5-M3x3	3	37.73	p_1-2	1.04	$\frac{GCI_{2-3}}{r^p GCI_{1-2}}$		
	IR5-M4x4	4	38.57	p_2-3	1.77		**1.00**	
	IR5-M5x5	5	38.54					

Nota. Se muestra el cálculo de índice de convergencia realizada en la simulación de modelos en mallas 1x1,2x2,3x3, 4x4 y 5x5 con MDT=1m, 2m, 3m, 4m y 5m.

La tabla 24 las mallas no estructuradas presentan relaciones de convergencia asintótica iguales o muy próximas a la unidad (1.00–1.01), indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. Asimismo, los valores de GCI son bajos en todos los MDT (0.07 %–2.37 %), lo que evidencia una reducida incertidumbre asociada al error de discretización. Los órdenes aparentes de convergencia muestran un comportamiento generalmente consistente, aunque algunos MDT presentan valores superiores a 3 para el segundo refinamiento, por lo que dichos resultados deben interpretarse de forma conjunta con los demás indicadores de convergencia. En conjunto, las mallas no estructuradas muestran un comportamiento de convergencia consistente para la variable área inundada.

Figura 38

Relación de convergencia asintótica de mallas de Área inundada



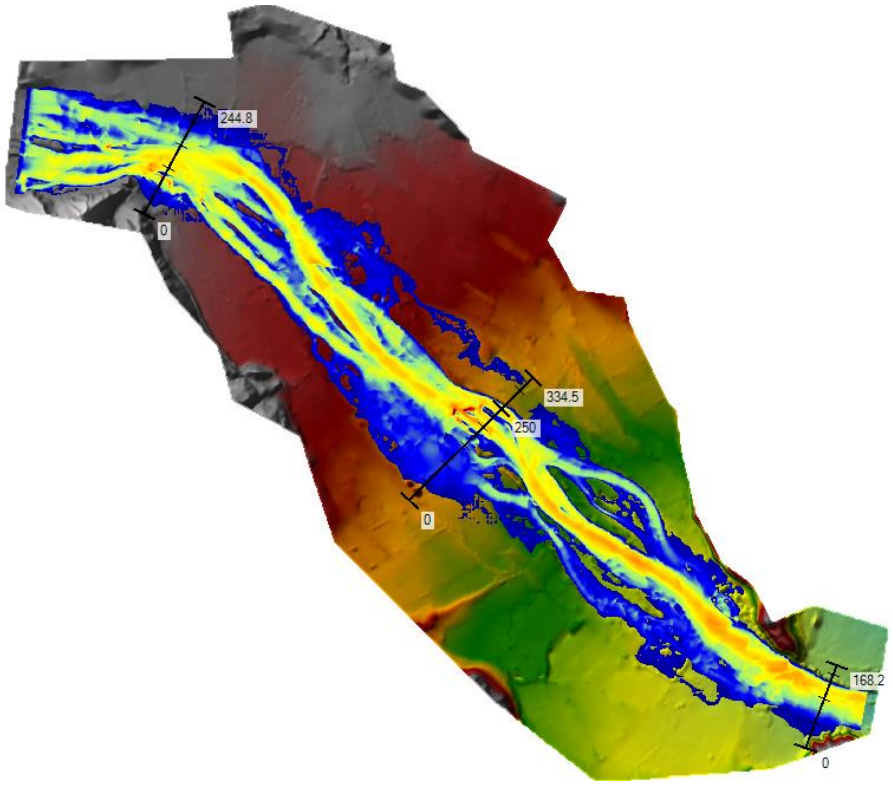
De la gráfica 38 muestra que la relación de convergencia asintótica del área inundada es cercana a la unidad para las mallas estructuradas y no estructuradas en todos los MDT evaluados, indicando que las soluciones se encuentran próximas al régimen de convergencia asintótica. En las mallas no estructuradas, los valores oscilan entre 0.997 y 1.006, mientras que en las mallas estructuradas varían entre 1.011 y 1.015. En ambos casos, las variaciones respecto al valor de referencia son reducidas, lo que evidencia un comportamiento de convergencia consistente para esta variable.

3.3.4. Análisis comparativo de secciones transversales.

Se seleccionó el MDT de 3 m porque, considerando conjuntamente los indicadores de convergencia (relación de convergencia asintótica, GCI y orden aparente de convergencia), así como el comportamiento de las variables hidráulicas analizadas (calado máximo, velocidad máxima y área inundada), presentó un comportamiento numérico consistente y un equilibrio entre la representación de la topografía y la estabilidad de los resultados. Por ello, se tomó como referencia para el análisis mediante secciones transversales.

Figura 39

Seccionamiento del modelo



Nota. Se muestra las secciones que se generaron para este análisis.

Figura 40

Sección transversal 1 en malla estructurada

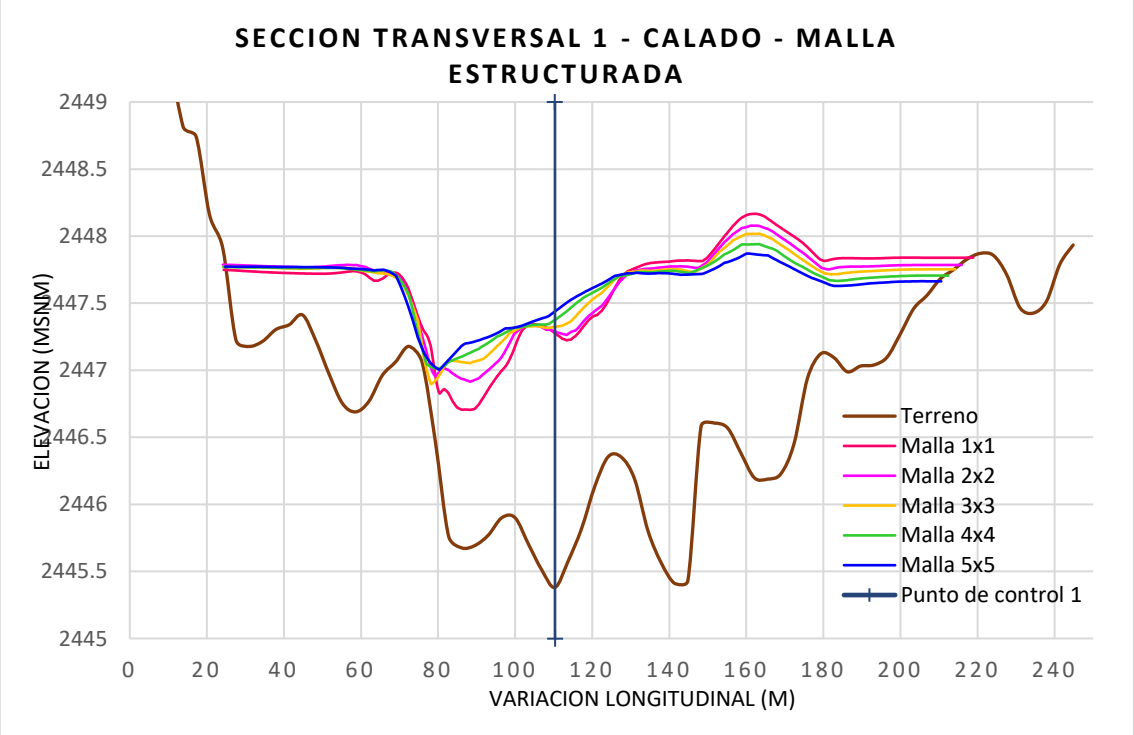


Figura 41
Sección transversal 2 en malla estructurada

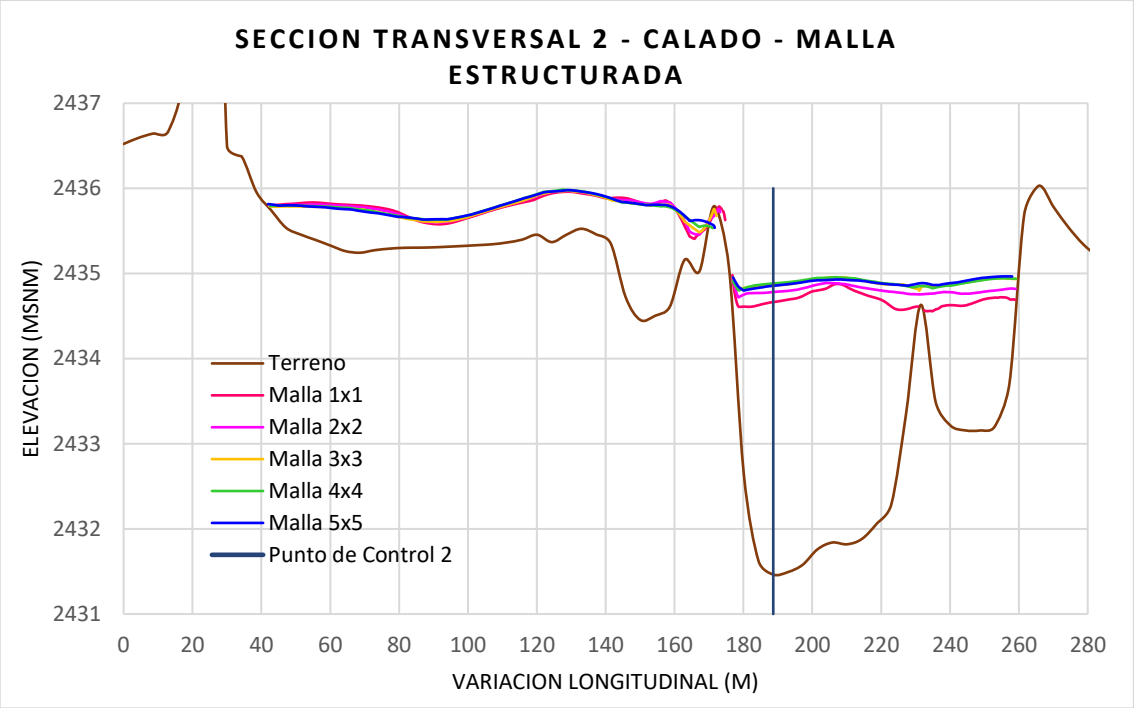


Figura 42
Sección transversal 3 en malla estructurada

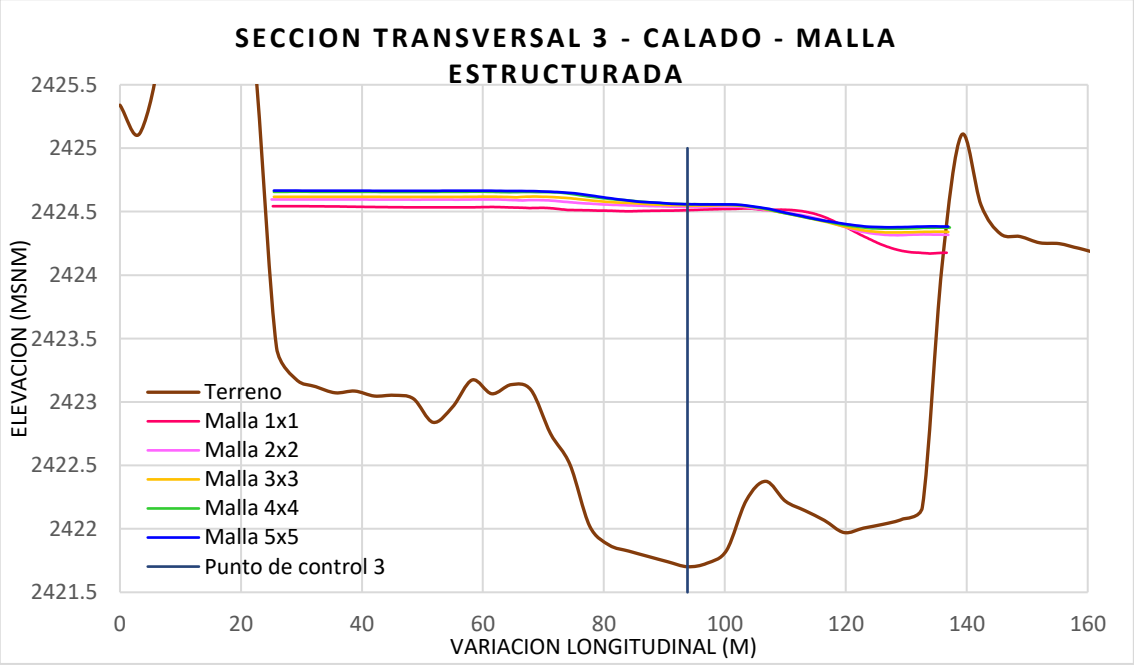


Tabla 25
Variación de cota en mallas estructuradas

Mallas estructuradas			
Malla	**Sección 1**	**Sección 2**	**Sección 3**
1	1.850	3.179	2.801
2	1.907	3.302	2.828
3	1.944	3.371	2.839
4	2.001	3.392	2.850
5	2.026	3.377	2.857
▲h	**0.176**	**0.213**	**0.056**

De la figura 40,41,42 y tabla 25, para las mallas estructuradas muestran que los perfiles de calado obtenidos con las diferentes mallas presentan una distribución similar en las tres secciones transversales evaluadas. La malla de 1×1, al representar el mayor nivel de refinamiento, constituye la referencia del análisis, observándose que las mallas de 2×2 y 3×3 reproducen perfiles muy similares, con diferencias reducidas respecto a esta. En cambio, las mallas de 4×4 y 5×5 presentan ligeras variaciones en la representación del perfil hidráulico, atribuibles a la menor capacidad de representar el relieve conforme aumenta el tamaño de la malla. Asimismo, la variación máxima de cota fue de 0.176 m, 0.213 m y 0.056 m para las secciones 1, 2 y 3, respectivamente, evidenciando que el MDT de 3 m mantiene una representación consistente del perfil hidráulico para las mallas más refinadas.

Figura 43
Sección transversal 1 en malla no estructurada

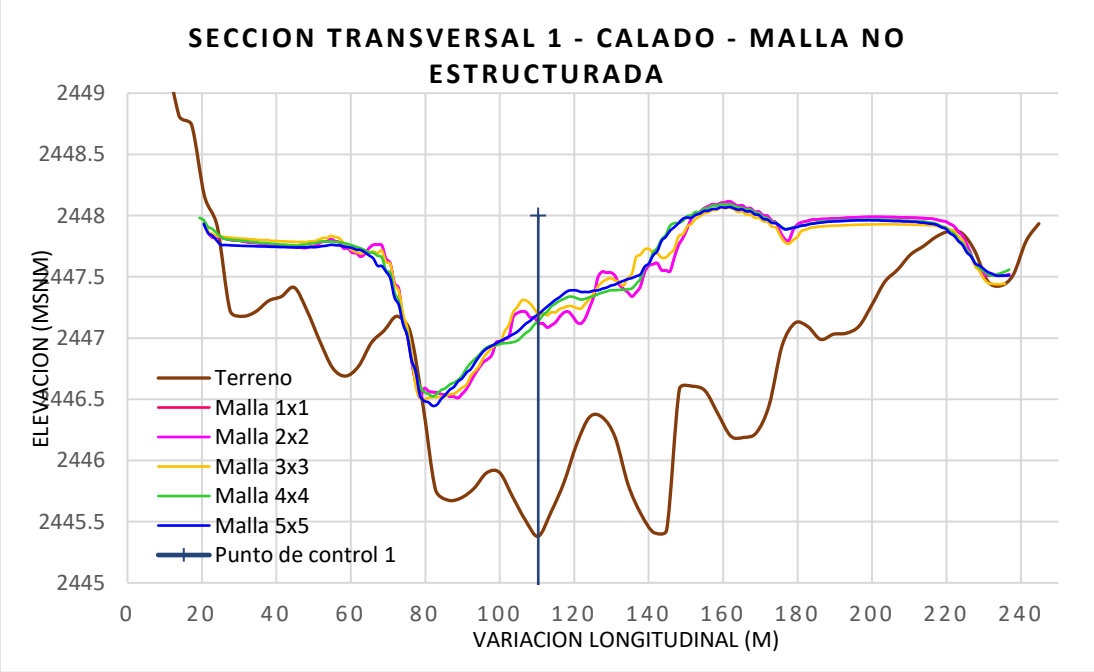


Figura 44

Sección transversal 2 en malla no estructurada

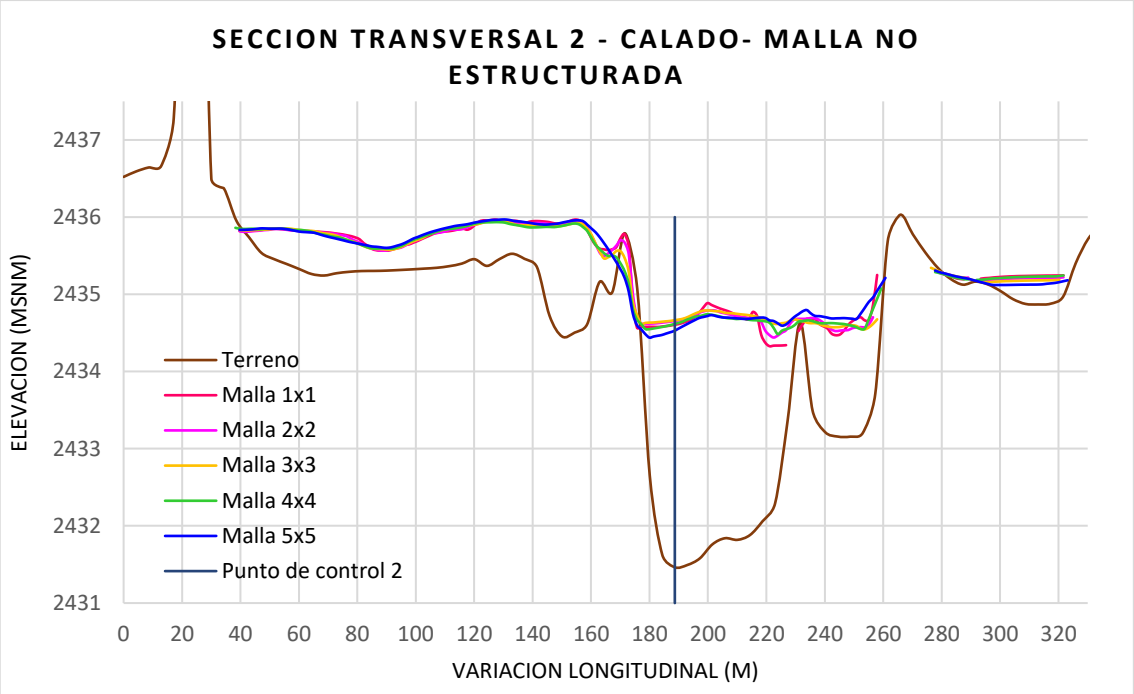


Figura 45

Sección transversal 3 en malla no estructurada

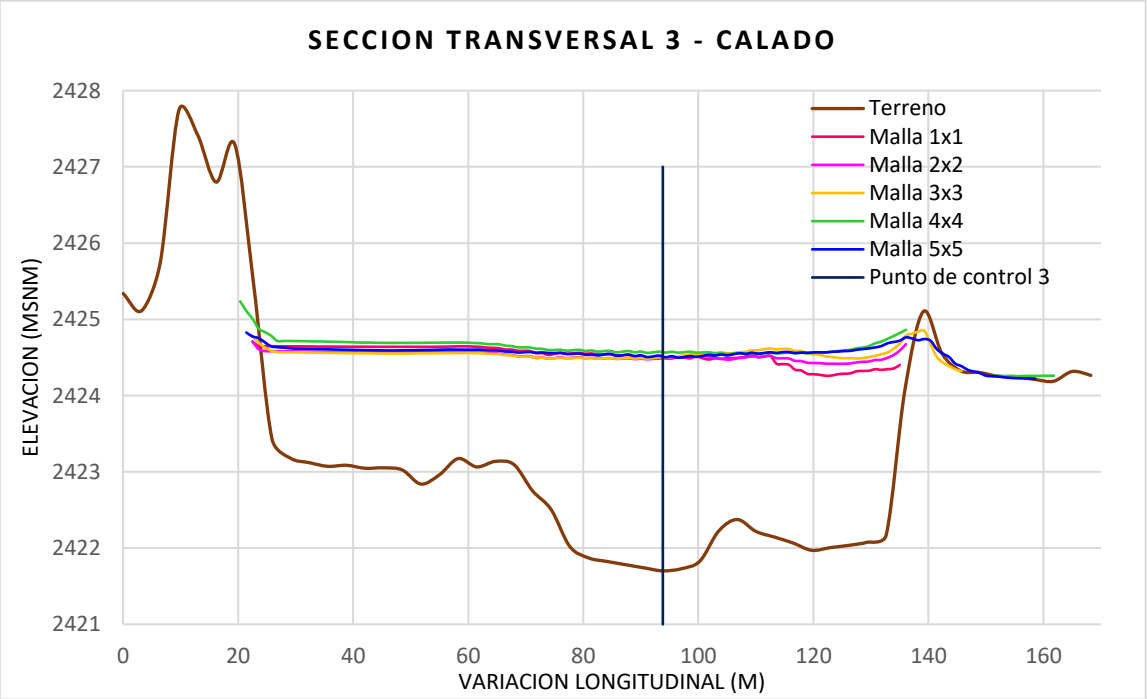


Tabla 26
Variación de cota en mallas no estructuradas

Mallas no estructuradas			
Malla	**Sección 1**	**Sección 2**	**Sección 3**
1	1.707	3.126	2.782
2	1.707	3.175	2.780
3	1.806	3.212	2.800
4	1.807	3.157	2.859
5	1.814	3.067	2.794
▲h	**0.107**	**0.145**	**0.079**

De la figura 43,44,45 y tabla 26, muestran que los perfiles de calado obtenidos con las mallas no estructuradas presentan una distribución similar en las tres secciones transversales evaluadas. La malla de 1×1, al representar el mayor nivel de refinamiento, constituye la referencia del análisis, observándose que la malla de 2×2 reproduce prácticamente el mismo perfil hidráulico, mientras que las mallas de 3×3, 4×4 y 5×5 presentan ligeras variaciones asociadas al incremento del tamaño de la malla. Asimismo, la variación máxima de cota fue de 0.107 m, 0.145 m y 0.079 m para las secciones 1, 2 y 3, respectivamente, evidenciando que el MDT de 3 m mantiene una representación consistente del perfil hidráulico en las mallas no estructuradas.

En conjunto, las mallas no estructuradas presentan menores variaciones de cota entre las secciones evaluadas que las mallas estructuradas, lo que sugiere una representación más uniforme del perfil hidráulico frente al cambio del tamaño de malla para el MDT de 3 m, bajo las condiciones analizadas.

3.4. Evaluación de tiempo de procesamiento

3.4.1. Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas

El tiempo que demora el modelo computacional en ejecutar una simulación numérica en HEC-RAS desde el inicio hasta obtener los resultados finales se muestra en la siguiente tabla 41.

Tabla 27
Tiempo de procesamiento en mallas estructuradas

Caudal (m^3/s)	MDT	Tamaño de malla	Código	Tiempo de simulación (h:min:s)	Tiempo en minutos (min)
749	1	1x1	HR1-M1x1	00:59:09	59.15
		2x2	HR1-M2x2	00:11:52	11.87

	3x3	HR1-M3x3	00:05:18	5.30
	4x4	HR1-M4x4	00:03:05	3.08
	5x5	HR1-M5x5	00:02:06	2.10
2	1x1	HR2-M1x1	01:00:37	60.62
	2x2	HR2-M2x2	00:11:36	11.60
	3x3	HR2-M3x3	00:05:09	5.15
	4x4	HR2-M4x4	00:02:59	2.98
	5x5	HR2-M5x5	00:02:05	2.08
3	1x1	HR3-M1x1	00:58:49	58.82
	2x2	HR3-M2x2	00:11:23	11.38
	3x3	HR3-M3x3	00:05:06	5.10
	4x4	HR3-M4x4	00:02:49	2.82
	5x5	HR3-M5x5	00:01:44	1.73
4	1x1	HR4-M1x1	00:58:25	58.42
	2x2	HR4-M2x2	00:11:01	11.02
	3x3	HR4-M3x3	00:04:54	4.90
	4x4	HR4-M4x4	00:02:52	2.87
	5x5	HR4-M5x5	00:01:39	1.65
5	1x1	HR5-M1x1	00:57:31	57.52
	2x2	HR5-M2x2	00:11:07	11.12
	3x3	HR5-M3x3	00:03:51	3.85
	4x4	HR5-M4x4	00:01:55	1.92
	5x5	HR5-M5x5	00:01:09	1.15

Nota. Se muestra el tiempo de procesamiento en mallas estructuradas.

De la tabla 27, los resultados muestran que el tiempo de procesamiento disminuye significativamente al incrementar el tamaño de la malla. Las mallas finas (1×1) presentan los mayores tiempos de simulación, cercanos a 60 minutos, mientras que las mallas más gruesas (5×5) reducen el tiempo a aproximadamente 1–2 minutos. Esto evidencia que el refinamiento de malla incrementa la demanda computacional del modelo, siendo el tamaño de la malla uno de los principales factores que influyen en el tiempo de procesamiento.

3.4.2. Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas

El tiempo que demora el modelo computacional en ejecutar una simulación numérica en IBER desde el inicio hasta obtener los resultados finales se muestra en la siguiente tabla 28.

Tabla 28

Tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas

Caudal (m^3/s)	MDT	Tamaño de malla	Código	Tiempo de simulación (h:min:s)	Tiempo en minutos (min)
749	1	1x1	IR1-M1x1	05:42:30	342.50
		2x2	IR1-M2x2	01:09:25	69.42
		3x3	IR1-M3x3	00:28:36	28.60
		4x4	IR1-M4x4	00:16:15	16.25
		5x5	IR1-M5x5	00:10:48	10.80
	2	1x1	IR2-M1x1	05:40:32	340.53
		2x2	IR2-M2x2	01:09:24	69.40
		3x3	IR2-M3x3	00:28:44	28.73
		4x4	IR2-M4x4	00:16:27	16.45
		5x5	IR2-M5x5	00:10:58	10.97
	3	1x1	IR3-M1x1	05:39:43	339.72
		2x2	IR3-M2x2	01:08:32	68.53
		3x3	IR3-M3x3	00:28:37	28.62
		4x4	IR3-M4x4	00:16:19	16.32
		5x5	IR3-M5x5	00:11:04	11.07
	4	1x1	IR4-M1x1	05:44:58	344.97
		2x2	IR4-M2x2	01:09:22	69.37
		3x3	IR4-M3x3	00:29:03	29.05
		4x4	IR4-M4x4	00:16:25	16.42
		5x5	IR4-M5x5	00:10:57	10.95
	5	1x1	IR5-M1x1	05:41:26	341.43
		2x2	IR5-M2x2	01:08:52	68.87
		3x3	IR5-M3x3	00:29:26	29.43
		4x4	IR5-M4x4	00:17:06	17.10
		5x5	IR5-M5x5	00:11:06	11.10

Nota. Se muestra el tiempo de procesamiento en mallas no estructuradas.

De la tabla 28, los resultados muestran que el tiempo de procesamiento disminuye notablemente al aumentar el tamaño de la malla. Las mallas finas (1×1) presentan los mayores tiempos de simulación, alrededor de 340 minutos, mientras que las mallas más gruesas (5×5) reducen el tiempo a aproximadamente 11 minutos. Esto demuestra que el refinamiento de malla incrementa la demanda computacional, siendo el tamaño de la malla uno de los principales factores que influyen en el tiempo de procesamiento.

3.4.3. Comparación de tiempo de procesamiento IBER HEC-RAS

Para la comparación del tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas, se considera únicamente el MDT de 1 m, debido a que el tiempo

computacional varía principalmente en función del tamaño y cantidad de elementos de la malla, más que de la resolución del MDT.

Tabla 29

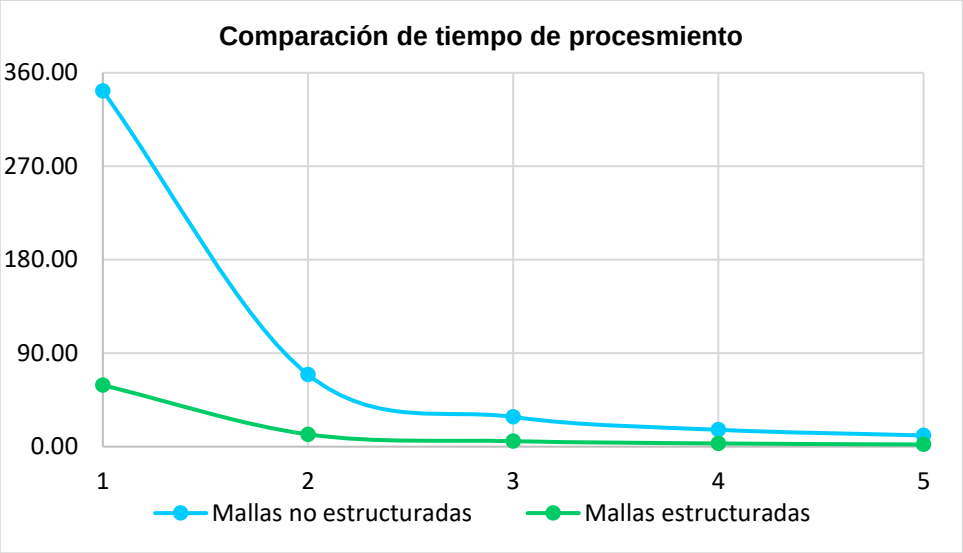
Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas

Tamaño de malla	Tiempo de mallas no estructuradas (min)	Tiempo de mallas estructuradas (min)	Factor de incremento	Porcentaje de incremento
1	342.50	59.15	5.79	479%
2	69.42	11.87	5.85	485%
3	28.60	5.30	5.40	440%
4	16.25	3.08	5.27	427%
5	10.80	2.10	5.14	414%

Nota. Se muestra la variación de tiempo de procesamiento entre la malla estructurada y no estructurada

Figura 46

Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas



Nota. Se muestra la gráfica visual de tiempo entre la malla estructurada y no estructurada

De la tabla 29 y figura 46, la relación de incremento varía un promedio de 5.49 veces, lo que representa aumentos entre 414 % y 485 %. Asimismo, se observa que, a medida que aumenta el tamaño de malla, la diferencia de tiempo entre ambos tipos de malla disminuye ligeramente. Esto evidencia que las mallas no estructuradas demandan un mayor tiempo de procesamiento debido al mayor número de elementos generados y a la complejidad geométrica de la discretización, lo que incrementa el esfuerzo computacional durante la resolución numérica del modelo.

3.5. Evaluación de costo computacional.

Tabla 30

Costo computacional de refinamiento en mallas no estructuradas

Tamaño de malla	Número de elementos	Razón efectiva	Factor de refinamiento	variación de costo computacional
1x1	1,360,887			1.0000
2x2	339,237	4.01		0.1732
3x3	150,461	2.25	2.40	0.0300
4x4	84,364	1.78		0.0052
5x5	53,999	1.56		0.0009

Nota. El costo computacional es incremental según el refinamiento de malla.

Tabla 31

Costo computacional de refinamiento en mallas estructuradas

Tamaño de malla	Número de elementos	Razón efectiva	Factor de refinamiento	variación de costo computacional
1x1	590,739			1.0000
2x2	147,414	4.01		0.1732
3x3	65,383	2.25	2.40	0.0300
4x4	36,711	1.78		0.0052
5x5	23,454	1.57		0.0009

Nota. El costo computacional es incremental según el refinamiento de malla.

La evaluación de la variación del costo computacional en función del refinamiento de la malla se presenta en las Tablas 30 y 31 para las mallas estructuradas y no estructuradas. Los resultados muestran que, al incrementar el tamaño de la malla, disminuyen el número de elementos, la variación del costo computacional y el tiempo de procesamiento. Las mallas de 2×2 reducen aproximadamente un 82.63 % el tiempo de procesamiento respecto a las mallas de 1×1, resultado consistente con lo señalado por Bladé et al. (2014), quienes indican que resoluciones excesivamente finas incrementan la demanda computacional sin generar mejoras proporcionales en los resultados numéricos. En las condiciones del presente estudio, el refinamiento por debajo de 2 m representa una mayor demanda computacional con variaciones reducidas en las variables hidráulicas analizadas.

3.6. Evaluación comparativa de la resolución del MDT.

El análisis de la resolución del MDT se basó en el calado, por ser la principal variable hidráulica en estudios de inundación y presentar un comportamiento de convergencia más consistente que la velocidad.

Tabla 32
Evaluación comparativa de la resolución del MDT.

Resolución MDT	GCI promedio	Relación asintótica promedio	Orden observado (p)	Interpretación
HEC-RAS - Mallas estructuradas				
1 m	1.15%	0.99	1.98	Convergencia adecuada; incertidumbre baja.
2 m	3.68%	0.99	1.01	Convergencia lenta, pero estable.
3 m	1.90%	0.99	1.57	Convergencia adecuada y comportamiento consistente.
4 m	1.00%	1.00	1.96	Mejor estabilidad numérica; comportamiento cercano al esperado.
5 m	0.19%	1.11	4.26	GCI muy bajo, pero p superior al esperado; posible artefacto numérico.
IBER - Mallas no estructuradas				
1 m	7.37%	1.06	-2.235	Convergencia oscilatoria.
2 m	13.23%	1.03	0.585	Convergencia lenta; elevada incertidumbre.
3 m	4.40%	1.02	1.325	Convergencia adecuada y estable.
4 m	1.14%	1.01	2.275	Muy baja incertidumbre; p ligeramente superior al esperado.
5 m	9.26%	1.04	-1.025	Convergencia oscilatoria.

La Tabla 32 resume los indicadores de convergencia numérica para las diferentes resoluciones del MDT en HEC-RAS 2D e IBER. En HEC-RAS los MDT de 1m,3 m y 4 m presentan un comportamiento consistente, con valores bajos de GCI, relaciones de convergencia asintótica próximas a la unidad y órdenes observados acordes con el comportamiento esperado. En IBER, el MDT de 3 m muestra el comportamiento más consistente al integrar los tres indicadores, mientras que los MDT de 1 m y 5 m presentan convergencia oscilatoria y el MDT de 2 m evidencia una convergencia más lenta. En conjunto, el MDT de 3 m presenta un equilibrio favorable entre la incertidumbre

por discretización, la proximidad al régimen asintótico y la estabilidad del orden observado de convergencia para las condiciones del presente estudio.

Los resultados concuerdan con lo reportado por Huxley et al. (2022) quienes identificaron la existencia de una resolución intermedia en la que los modelos hidráulicos alcanzan una adecuada estabilidad numérica y una relativa independencia de malla, sin demandar costos computacionales excesivos. En el caso del valle Antacucho, los análisis de convergencia sugieren que las resoluciones intermedias permiten mantener resultados hidráulicos consistentes, reduciendo simultáneamente el esfuerzo computacional respecto a las mallas más finas.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

1) La resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y el tamaño de malla influyen en el comportamiento de las simulaciones bidimensionales de inundación realizadas mediante HEC-RAS 2D e IBER. Las variaciones en la resolución del MDT modifican la representación del relieve y las variables hidráulicas simuladas, mientras que el tamaño de malla influye principalmente en la estabilidad numérica y en la demanda computacional. Los resultados obtenidos evidencian que la influencia de estos parámetros depende del modelo hidráulico utilizado y de las condiciones geomorfológicas del área de estudio.
2) Se desarrollaron satisfactoriamente los modelos hidráulicos bidimensionales en HEC-RAS 2D e IBER utilizando cinco resoluciones del MDT (1m, 2m, 3m, 4m y 5 m) y cinco tamaños de malla (1×1, 2×2, 3×3, 4×4 y 5×5) metros, permitiendo analizar la influencia de estos parámetros sobre el comportamiento hidráulico y numérico de las simulaciones. Los resultados evidenciaron que la resolución del MDT influye en la representación de la topografía y de las variables hidráulicas, mientras que el tamaño de malla condiciona el nivel de discretización espacial empleado por cada modelo.
3) La comparación y evaluación de las características hidráulicas demostraron que el calado máximo y el área inundada presentaron un comportamiento más estable a los cambios de resolución del MDT y tamaño de malla, mientras que la velocidad máxima es más sensible al refinamiento de la discretización. Se cuantificó que las mallas no estructuradas (IBER) demanda un promedio de 5.49 veces más tiempo que las mallas estructuradas (HEC-RAS). Se verificó además que el tiempo de procesamiento depende principalmente del tamaño de malla y no de la resolución del MDT.
4) La evaluación integrada de la convergencia numérica, las variables hidráulicas y la eficiencia computacional evidenció que el MDT de 3 m presentó un comportamiento consistente en ambos modelos hidráulicos. Asimismo, la malla de 2×2 m redujo el tiempo de procesamiento en 82.63 % respecto a la malla de 1×1 m, sin variaciones significativas en las variables hidráulicas. Para las condiciones del valle Antacucho, el MDT de 3 m, la malla de 2×2 m y las mallas no estructuradas (IBER) representaron un equilibrio favorable entre la

consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

4.2. Recomendaciones

- Utilizar resoluciones intermedias del Modelo Digital del Terreno (MDT) al trabajarse con datos topográficos de alta resolución, en modelamientos hidráulicos bidimensionales, debido a que permiten obtener resultados hidráulicos estables y confiables.
- Emplear la malla intermedia (malla 2x2) tanto en mallas estructuradas como no estructuradas, ya que presentó adecuada convergencia numérica y un mejor equilibrio entre precisión hidráulica y eficiencia computacional.
- Considerar el uso de mallas no estructuradas en zonas con geometrías complejas o variaciones topográficas pronunciadas y para estudios de defensas ribereñas, debido a que presentan mejor adaptación espacial y mayor estabilidad en parámetros sensibles como la velocidad.
- Incorporar análisis de convergencia numérica mediante el índice GCI y relaciones de convergencia en futuros estudios hidráulicos, con la finalidad de verificar la independencia de malla y garantizar mayor confiabilidad en los resultados simulados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abily, M., Delestre, O., Gourbesville, P., Bertrand, N., Duluc, C.-M., & Richet, Y. (2016). Global sensitivity analysis with 2D hydraulic codes: Application on uncertainties related to high-resolution topographic data. *Springer Water*, 301–315. https://doi.org/10.1007/978-981-287-615-7_21

Agisoft LLC. (2024). *Agisoft Metashape user manual professional edition (version 2.3)*. https://www.agisoft.com

Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thieken, A. H. (2009). Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, *49*(1), 79–98. https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-008-9277-8

Ashgriz, N., & Mostaghimi, J. (2001). *An introduction to computational fluid dynamics*.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, *30*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/J.RIMNI.2012.07.004

Canchari, L. (2023). *Análisis comparativo del modelamiento hidráulico utilizando IBER y HEC-RAS para determinar áreas inundables en la Quebrada del Diablo, Región Tacna*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4375

Castedo, R., Reifarth, C., Santos, A. P., Losada, J., López, L. M., Chiquito, M., & Mancilla, J. M. (2019). Application of grid convergence index to shock wave validated with LS-DYNA and ProsAir. *Ingeniería e Investigación*, *39*(3), 20–26. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092019000300020&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Chaudhry, M. H. (2008). Open-channel flow: Second Edition. *Open-Channel Flow: Second Edition*, 1–523. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68648-6/SAVE-RESEARCH

Chavez, H. (2024). *Instructivo de prácticas de laboratorio de modelación numérica para analizar la hidrodinámica de cauces naturales: Instructivo de prácticas de laboratorio de modelación numérica para analizar la hidrodinámica de cauces naturales en dos dimensiones mediante el programa IBER*.

Chow, V. T. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*.

Chow, V. T., & Maidment, D. R. (1998). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.

Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, *377*(1–2), 131–142. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.015

Fernández, J. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos : introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. https://books.google.com/books/about/T%C3%A9cnicas_num%C3%A9ricas_en_ingenier%C3%ADa_de_f.html?hl=es&id=-WGXtgAACAAJ

Fernández, L. A. (2016). *Comportamiento bidimensional para determinar mancha de inundación de la cuenca río Cachi - Sectores de Laramate Santiago de Pischa - Huamanga - Ayacucho* [Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3720

GEASIG. (2018). *IBER Y ARCGIS Modelización hidráulica bidimensional*.

Gomes, E., & Garcia, C. (2012). A finite element method based on capturing operator applied to wave propagation modeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *201–204*, 127–138. https://doi.org/10.1016/J.CMA.2011.10.006

Hernández, R., Fernádez, C., & Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación. *Metodología de La Investigación*, 1–634. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008&info=resumen&idioma=SPA

Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, *253*(1–4), 239–249. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00490-5

Huxley, C., Syme, B., Ryan, P., & Collecutt, G. (2022). *Hydraulic Modelling 2D Cell Size Result Convergence-Comparing the Performance of Different Shallow Water Equation Solution Schemes*.

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2004). Digital terrain modeling: Principles and methodology. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, 1–320. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203357132/digital-terrain-modeling-zhilin-li-christopher-zhu-chris-gold

Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación.

Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. https://doi.org/10.35622/INUDI.B.080

Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J. (2008). GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling and Software*, *23*(10–11), 1300–1311.

Morales, J., Pérez, J., & Delgado, F. (2018). *Comparación de modelos numéricos HEC-RAS e Iber en la modelación de inundaciones urbanas*. 105–117.

Orellana, R. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS*.

Roache, P. J. (1998). *Funadamentals of verification and validation*.

Schumann, G., Matgen, P., Hoffmann, L., Hostache, R., Pappenberger, F., & Pfister, L. (2007). Deriving distributed roughness values from satellite radar data for flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, *344*(1–2), 96–111. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2007.06.024

Sierra, H. (2018). *Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del rio Pativilca, en flujo no permanente* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. https://hdl.handle.net/20.500.12996/3545

Smith, K., & Ward, R. (1998). Floods: Physical processes and human impacts. *Book*, 394. https://www.wiley.com/en-us/Floods%3A+Physical+Processes+and+Human+Impacts-p-9780471952480

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, *90*, 201–216. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815216310040

Torres, C. A. B. (2010). Metodologia de la investigación para administración, economía, humanidades y ciencias sociales. In *Pautas para la redacción de manuscritos según el manual APA*. Pearson Prentice Hall. https://pure.unisabana.edu.co/es/publications/metodologia-de-la-investigaci%C3%B3n-para-administraci%C3%B3n-econom%C3%ADa-huma/

U.S. Army Corps of Engineers. (2025). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual* (Hydrologic Engineering Center, Ed.).

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.*

Xaman, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. https://books.google.com/books/about/Din%C3%A1mica_De_Fluidos_Computacional_Para.html?hl=es&id=dwIDDAAAQBAJ

Zapata Escudero, J. S. (2022). *Mapas de peligro por inundación del río Chibunga en el tramo de influencia al Parque Lineal ubicado en la ciudad de Riobamba: modelación hidrodinámica bidimensional del río Chibunga, en el tramo de influencia al parque lineal ubicado en la ciudad de Riob*…. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23010

ACRÓNIMOS

MDT **:** *Modelo digital del terreno.*

HEC – RAS **:** Hydrologic Engineering Center – River Analysis System.

RTK **:** Real-Time Kinematic (Cinemática en Tiempo Real).

GCI **:** Grid Convergence Index (Índice de Convergencia de Malla).

2D : *Bidimensional.*

SIG : *Sistema de información geográfica.*

IBER : *Modelo hidráulico bidimensional IBER.*

CFD : *Dinámica de fluidos computacional.*

CPU : *Central Processing Unit (Unidad central de procesamiento).*

TIN : *Triangulated Irregular Network (Red irregular triangulada).*

LiDAR : *Light Detection and Ranging (Detección y medición por luz).*

GLOSARIO

Área inundada : Superficie cubierta por agua durante un evento hidráulico simulado.

Calado hidráulico : Altura o profundidad del agua medida desde el fondo del cauce hasta la superficie libre.

Convergencia numérica : Proceso mediante el cual los resultados de una simulación tienden a estabilizarse al refinar la malla computacional.

Costo computacional : Cantidad de recursos y tiempo requeridos para ejecutar una simulación numérica.

Discretización espacial : División del dominio hidráulico en elementos o celdas para resolver numéricamente el flujo.

Flujo bidimensional : Movimiento del agua representado en dos direcciones horizontales dentro de un modelo hidráulico.

GCI : Índice utilizado para evaluar el error numérico y la independencia de malla en simulaciones computacionales.

Independencia de malla : Condición en la que el refinamiento adicional de la malla produce cambios mínimos en los resultados simulados.

Malla estructurada : Discretización compuesta por elementos organizados regularmente, generalmente de forma cuadrada o rectangular.

Malla no estructurada : Discretización formada por elementos irregulares adaptables a geometrías complejas del terreno.

Modelo hidráulico bidimensional : Herramienta numérica utilizada para simular el comportamiento del flujo de agua en dos dimensiones.

Modelo Digital del Terreno (MDT) : Representación digital de la superficie del terreno sin considerar objetos superficiales.

Orden aparente de convergencia : Parámetro que indica la velocidad con la que una solución numérica converge hacia la solución exacta.

Relación de convergencia **:** Indicador utilizado para verificar si una solución numérica se encuentra dentro de la región asintótica de convergencia.

Resolución del MDT **:** Tamaño de celda o nivel de detalle espacial del Modelo Digital del Terreno.

Simulación hidráulica **:** Proceso numérico que reproduce el comportamiento del flujo de agua en un sistema hidráulico.

Solución asintótica **:** Valor extrapolado al que tiende una solución numérica cuando la malla se refina progresivamente.

Tiempo de procesamiento **:** Tiempo requerido por el software para ejecutar una simulación hidráulica.

Velocidad del flujo **:** Rapidez con la que el agua se desplaza en un modelo hidráulico.

ANEXOS:

ANEXO A
PANEL FOTOGRÁFICO

Figura N° 1: Vista Aérea del valle Antacucho.



Figura N° 2: Vista de la estación de la base del equipo de GPS diferencial.



Figura N° 3: Vista de la toma de puntos de referencia con el Rover del equipo GPS diferencial.



Figura N° 4: Puntos de control en campo**.**



Figura N° 5: Vista aérea del vuelo con el dron EVO II PRO RTK



Figura N° 6: Vista del valle de Antacucho después de un evento de máximas avenidas.



Figura N° 7: Vista de la huella hídrica y casas afectadas en un evento de máxima avenida en el valle Antacucho.



Figura N° 8: Vista de los daños y vías de acceso afectadas por un evento de máxima avenida.

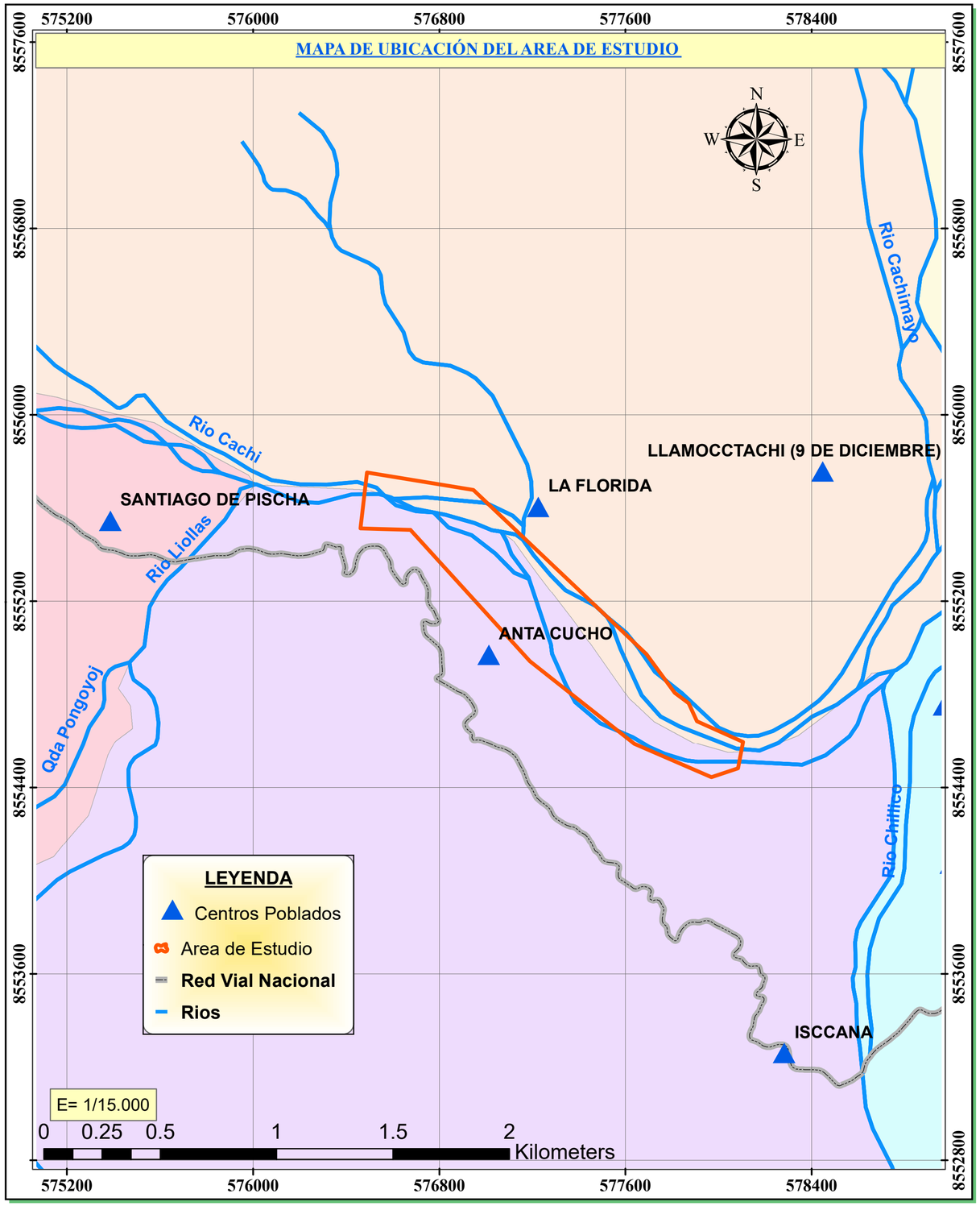


ANEXO B

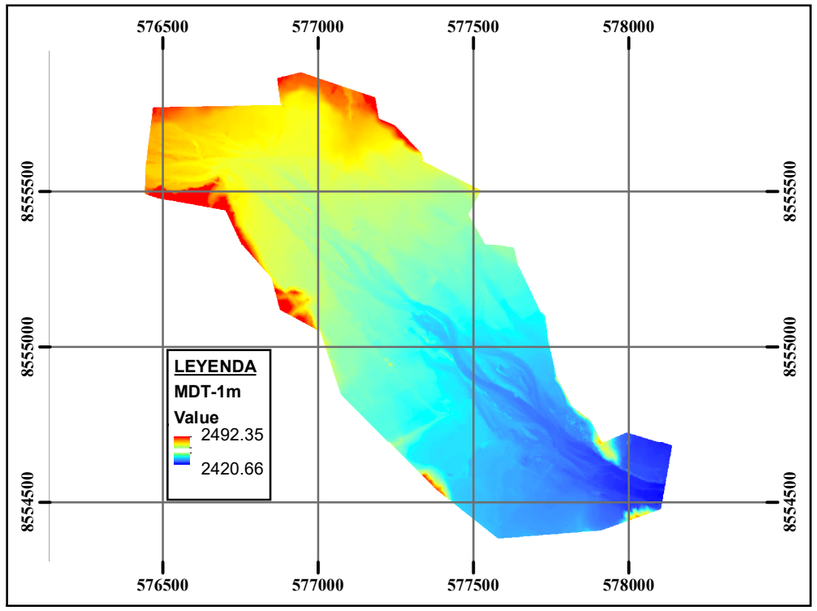
PLANOS

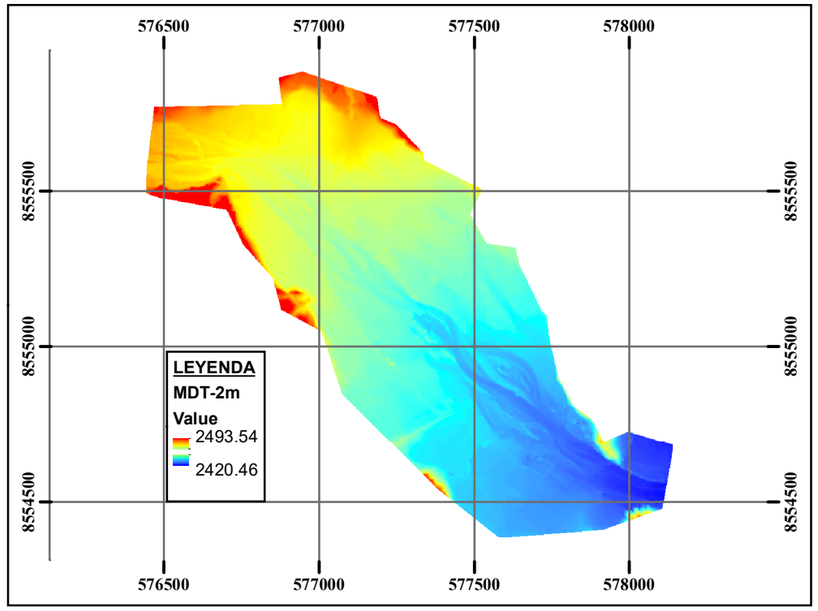


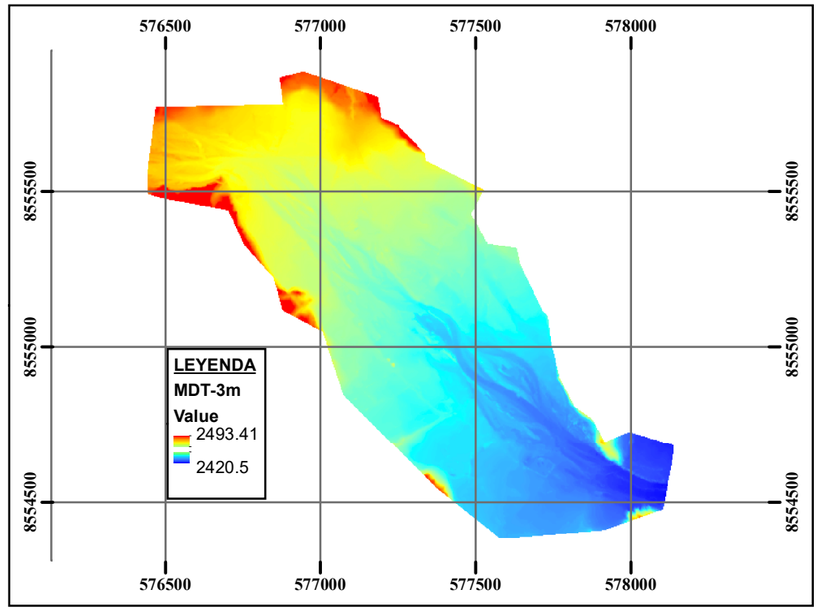


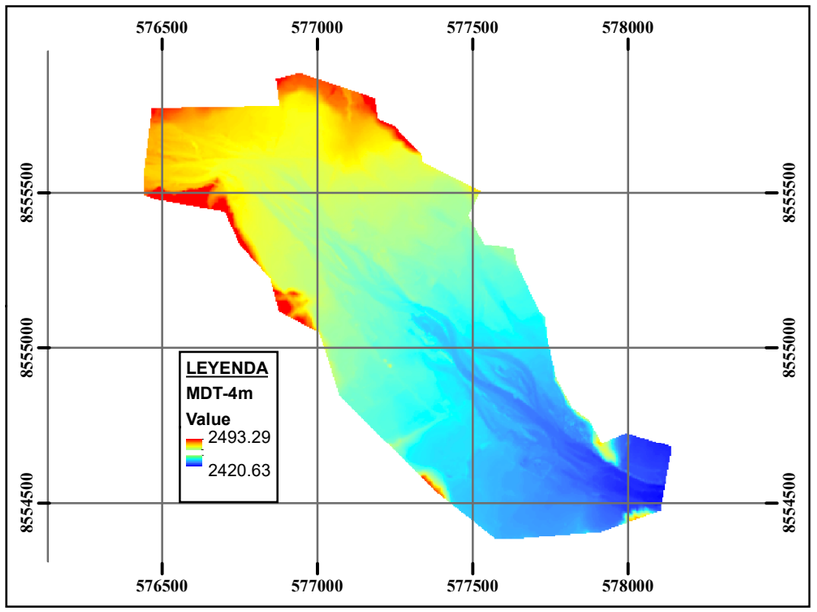


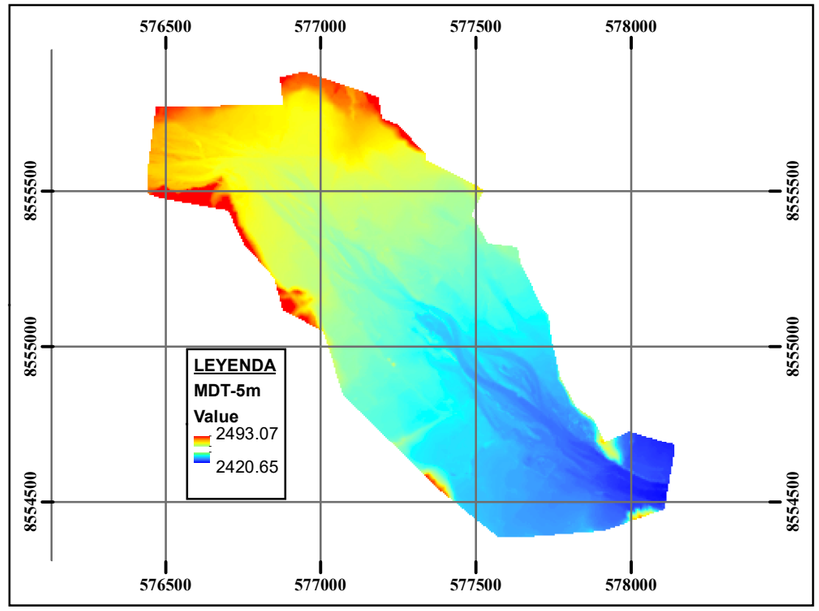
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA			
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA			
Proyecto: Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho – Ayacucho 2025			
Ubicación Departamento : Ayacucho Provincia : Huamanga Distrito : San Jose de Ticllas Localidad : Valle Antacucho	**Coordenadas:** WGS-1984 UTM-18S **Escala:** Indicada	**Fecha:** Mayo-2026	**Plano:** Ubicación **Dibujo:** Maycol Espino Cayllahua	**Lamina:** U







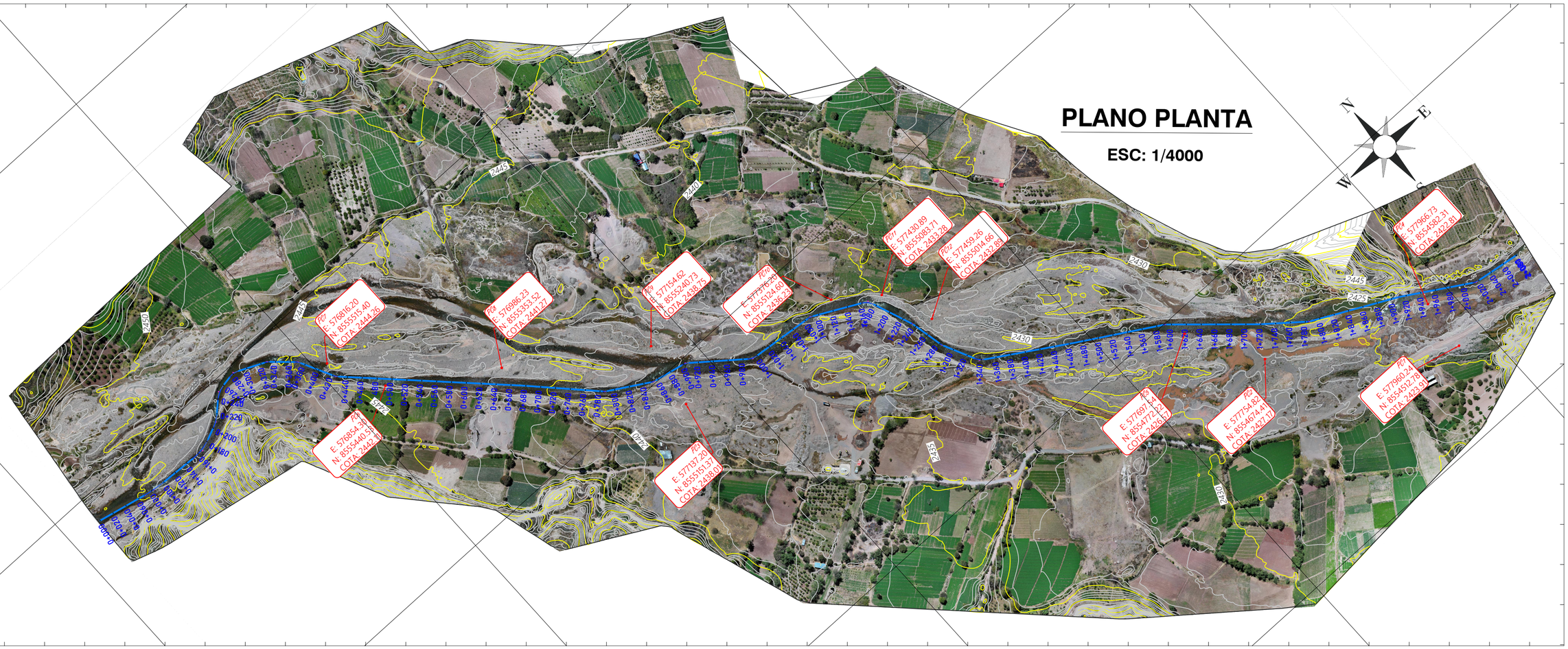




UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA			
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA			
Proyecto: Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho – Ayacucho 2025			
Ubicación Departamento : Ayacucho Provincia : Huamanga Distrito : San Jose de Ticllas Localidad : Valle Antacucho	**Coordenadas:** WGS-1984 UTM-18S	**Plano:** Modelo Digital de Terreno	**Lamina:** ***MDT***
	Escala: Indicada	**Fecha:** Mayo-2026	**Dibujo:** Maycol Espino Cayllahua

PLANO PLANTA

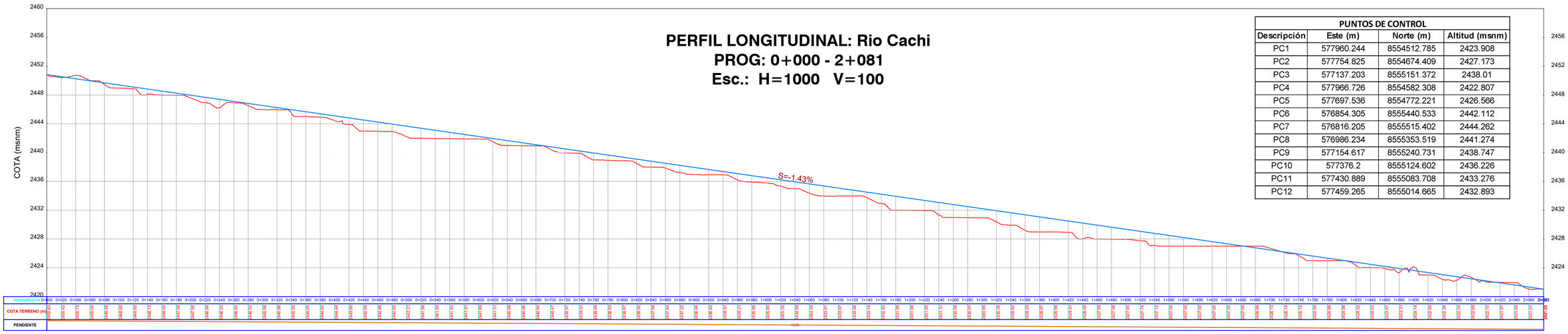
ESC: 1/4000



PERFIL LONGITUDINAL: Rio Cachi

PROG: 0+000 - 2+081

Esc.: H=1000 V=100



PUNTOS DE CONTROL			
Descripción	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)
PC1	577960.244	8554512.785	2423.908
PC2	577754.825	8554674.409	2427.173
PC3	577137.203	8555151.372	2438.01
PC4	577966.726	8554582.308	2422.807
PC5	577697.536	8554772.221	2426.566
PC6	576854.305	8555440.533	2442.112
PC7	576816.205	8555515.402	2444.262
PC8	576986.234	8555353.519	2441.274
PC9	577154.617	8555240.731	2438.747
PC10	577376.2	8555124.602	2436.226
PC11	577430.889	8555083.708	2433.276
PC12	577459.265	8555014.665	2432.893

LEYENDA			
SIMBOLO	DESCRIPCION	SIMBOLO	DESCRIPCION
	PUNTOS DE CONTROL		RIO
	EJE DEL CAUCE	3690.0	CURVA DE NIVEL (MAYORES)
	CARRETERA		CURVA DE NIVEL (MENORES)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Proyecto:

Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho – Ayacucho 2025

Ubicación

Departamento : Ayacucho

Provincia : Huamanga

Distrito : San Jose de Ticllas

Localidad : Valle Antacucho

Coordenadas: WGS-1984 UTM-18S

Plano: Planta Perfil

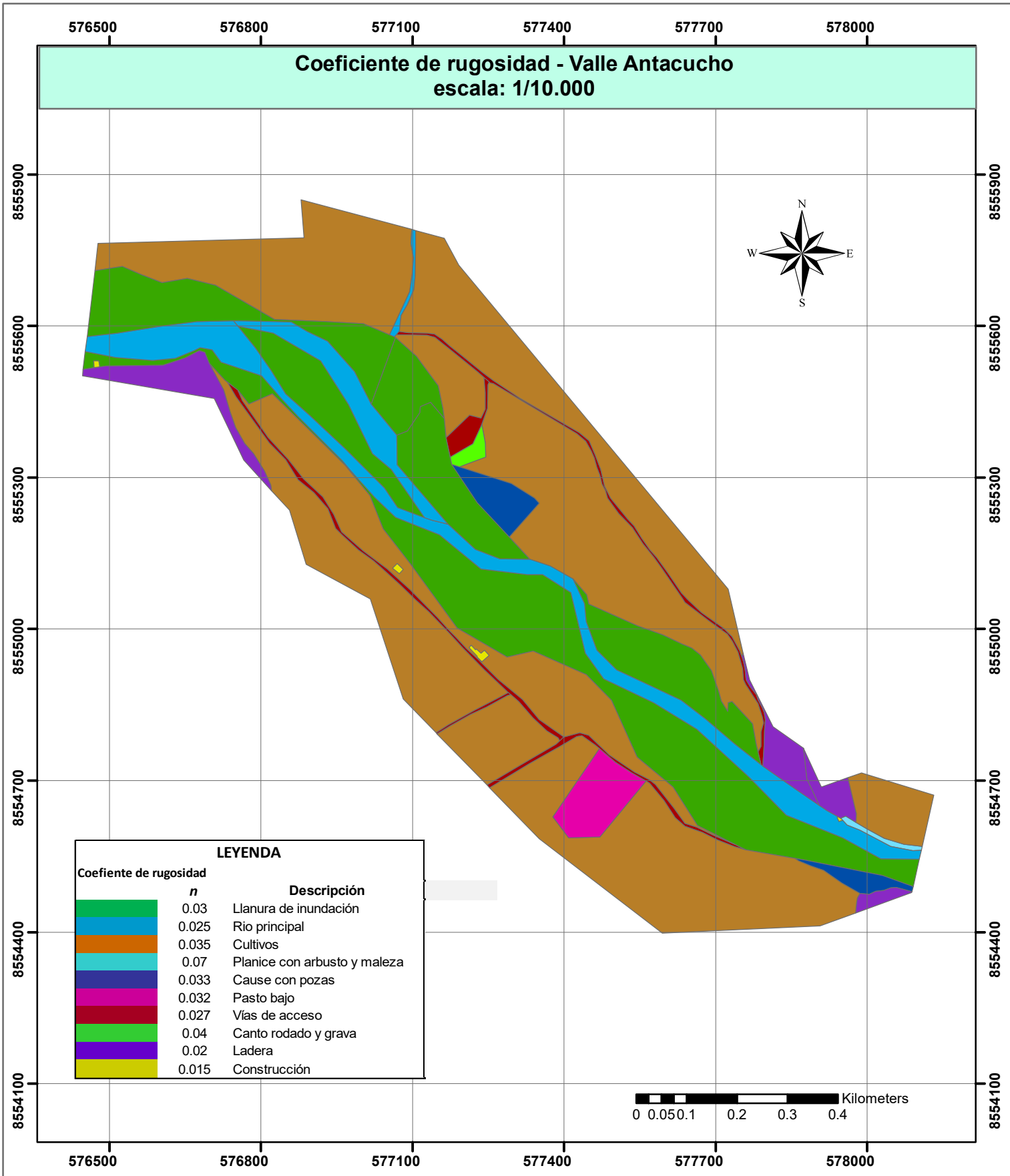
Escala: Indicada

Fecha: Mayo-2026

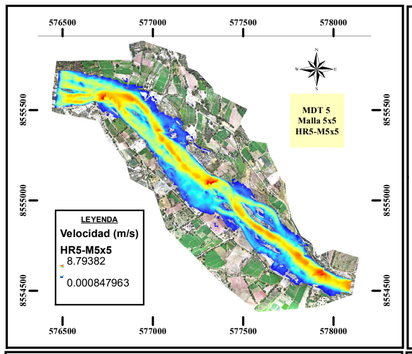
Dibujo: Maycol Espino Cayllahua

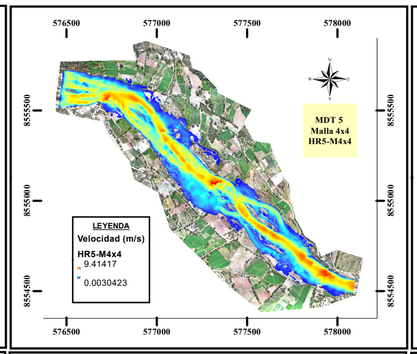
Lamina: *PP*

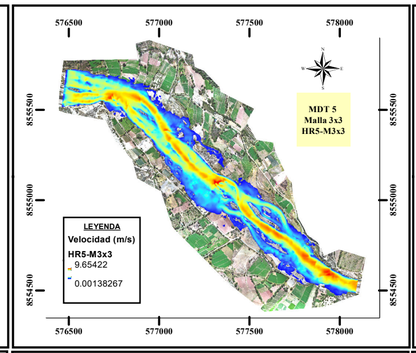
Coeficiente de rugosidad - Valle Antacucho
escala: 1/10.000

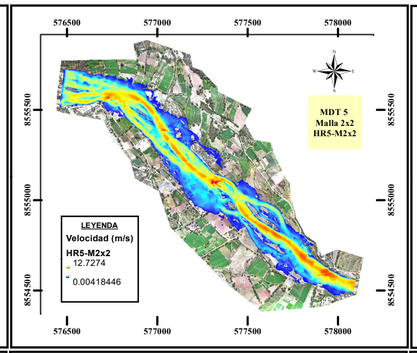


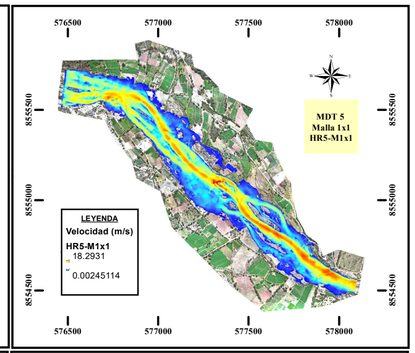
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA			
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA			
Proyecto: Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho – Ayacucho 2025			
Ubicación Departamento : Ayacucho Provincia : Huamanga Distrito : San Jose de Ticllas Localidad : Valle Antacucho	**Coordenadas:** WGS-1984 UTM-18S	**Plano:** Coeficiente de Rugosidad	**Lamina:** *n*
	Escala: Indicada	**Fecha:** Mayo-2026	**Dibujo:** Maycol Espino Cayllahua

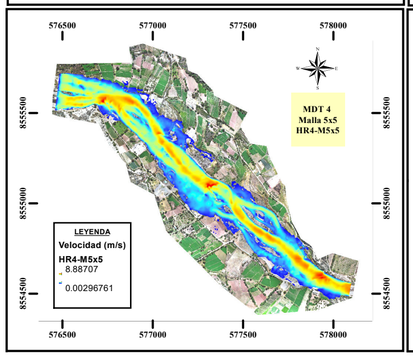


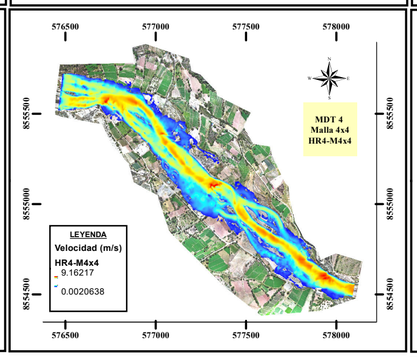


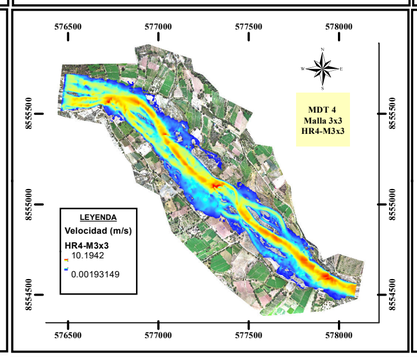


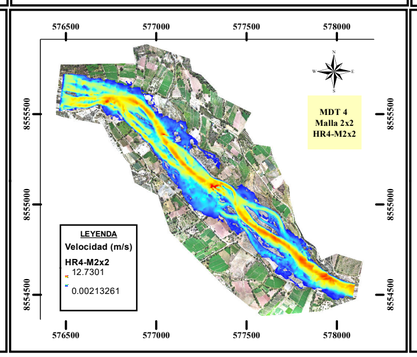


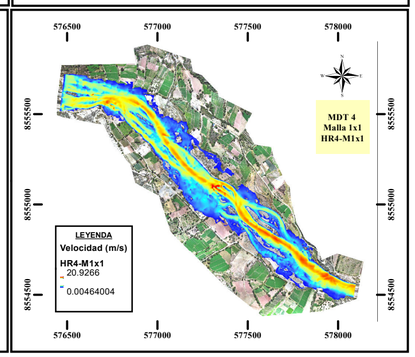


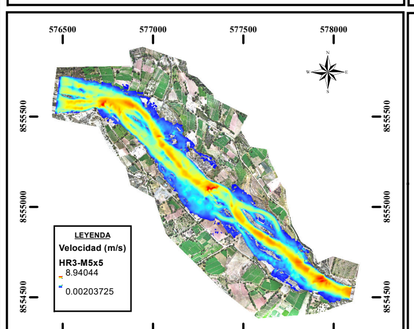


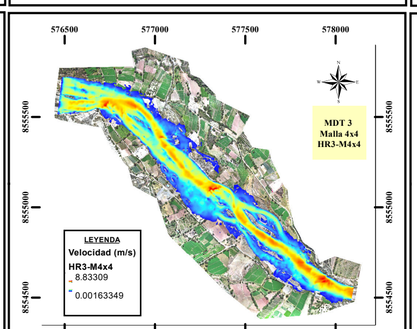


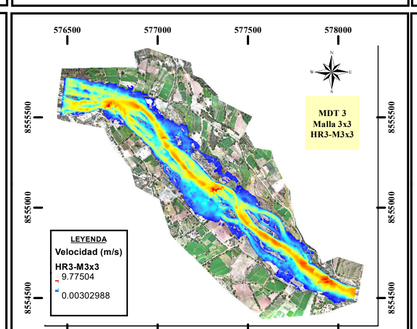


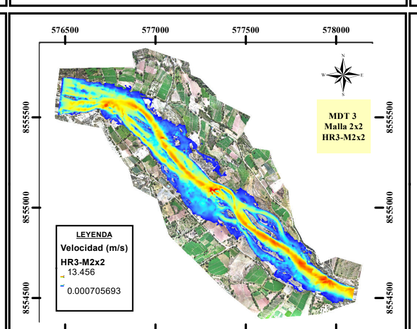


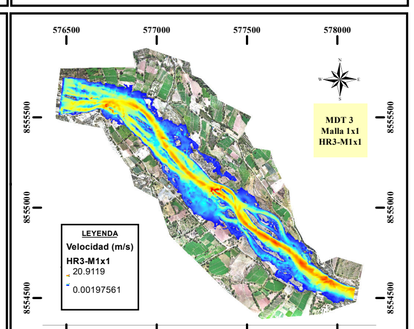


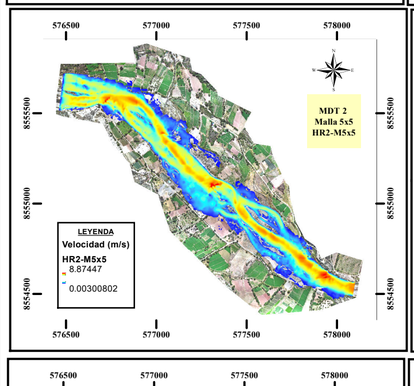


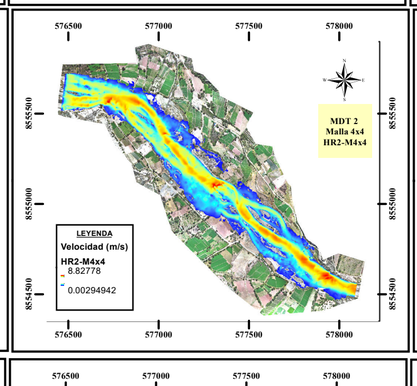


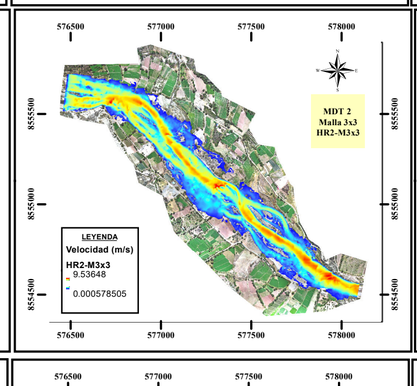


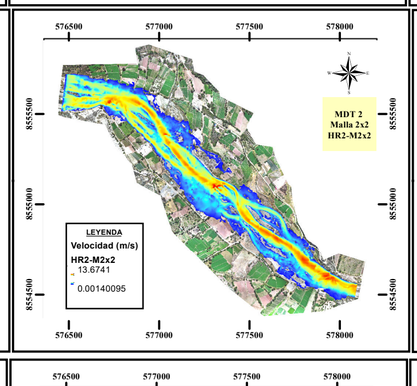


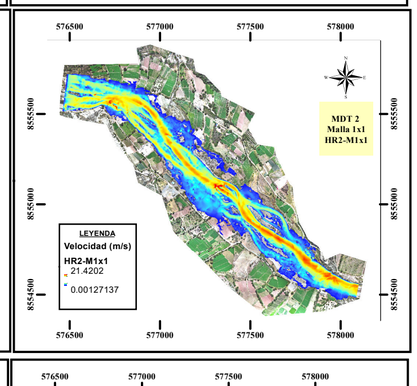


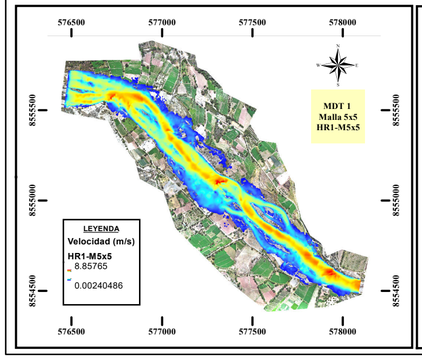


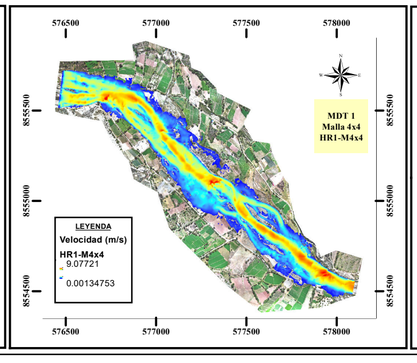


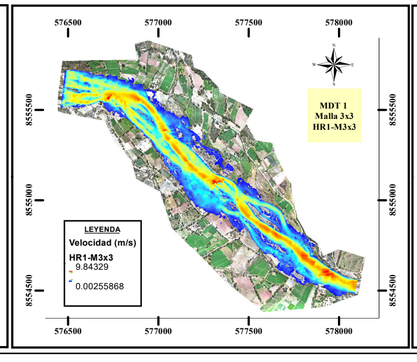


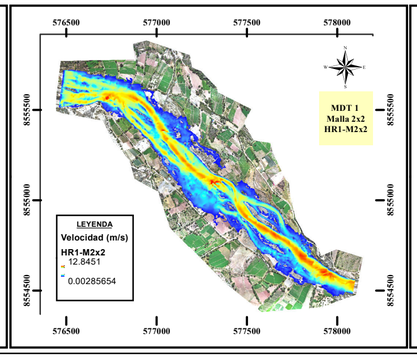


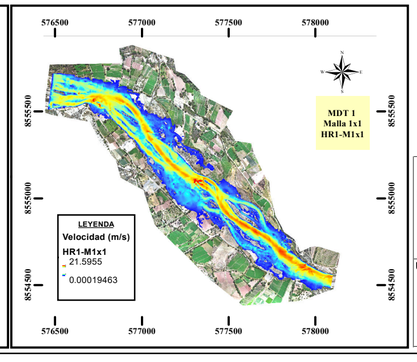












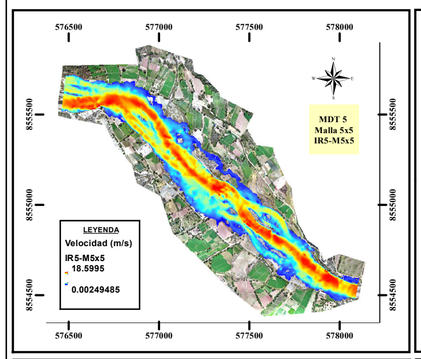
MDT	Tamaño de malla	Código	Velocidad maxima (m/s)	Velocidad minima (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
1	1x1	HR1-M1x1	21.60	0.00019	10.80
	2x2	HR1-M2x2	12.85	0.00286	6.42
	3x3	HR1-M3x3	9.84	0.00256	4.92
	4x4	HR1-M4x4	9.08	0.00135	4.54
	5x5	HR1-M5x5	8.86	0.00240	4.43
2	1x1	HR2-M1x1	21.42	0.00127	10.71
	2x2	HR2-M2x2	13.67	0.00140	6.84
	3x3	HR2-M3x3	9.54	0.00058	4.77
	4x4	HR2-M4x4	8.83	0.00295	4.42
	5x5	HR2-M5x5	8.87	0.00301	4.44
3	1x1	HR3-M1x1	20.91	0.00198	10.46
	2x2	HR3-M2x2	13.46	0.00071	6.73
	3x3	HR3-M3x3	9.78	0.00303	4.89
	4x4	HR3-M4x4	8.83	0.00163	4.42
	5x5	HR3-M5x5	8.94	0.00204	4.47
4	1x1	HR4-M1x1	20.93	0.00464	10.47
	2x2	HR4-M2x2	12.73	0.00213	6.37
	3x3	HR4-M3x3	10.19	0.00193	5.10
	4x4	HR4-M4x4	9.16	0.00206	4.58
	5x5	HR4-M5x5	8.89	0.00297	4.45
5	1x1	HR5-M1x1	16.88	0.00245	8.44
	2x2	HR5-M2x2	12.73	0.00418	6.37
	3x3	HR5-M3x3	8.75	0.00138	4.38
	4x4	HR5-M4x4	9.41	0.00304	4.71
	5x5	HR5-M5x5	8.56	0.00085	4.28

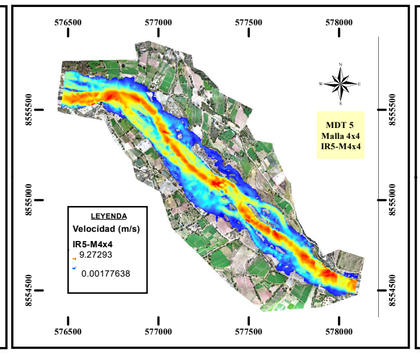
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

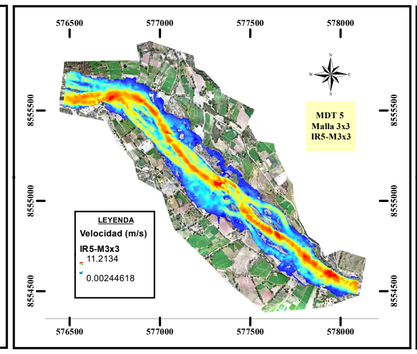
Proyecto:

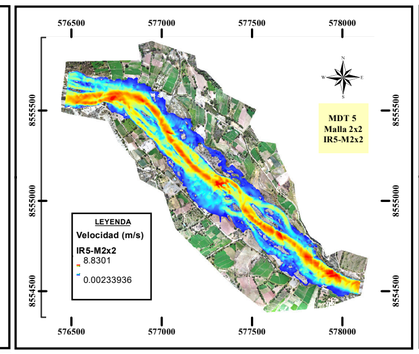
Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho – Ayacucho 2025

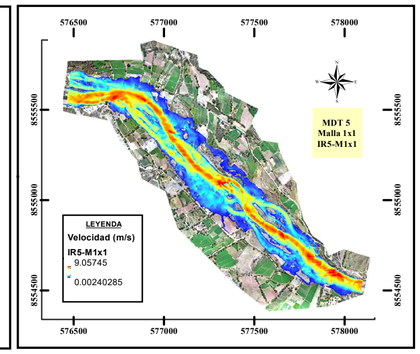
Ubicación	Coordenadas:	Plano:	Lamina:
Departamento : Ayacucho	WGS-1984 UTM-18S	Velocidad - HEC-RAS	V-H
Provincia : Huamanga			
Distrito : San Jose de Ticllas	Escala:	Fecha:	Dibujo:
Localidad : Valle Antacucho	1/25000	Mayo-2026	Maycol Espino Cayllahua

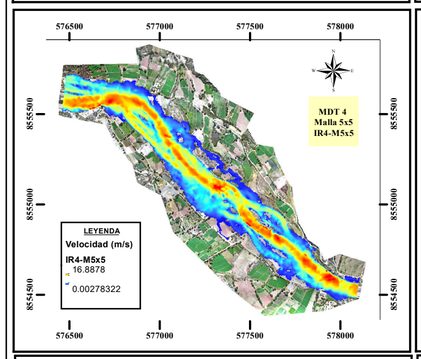


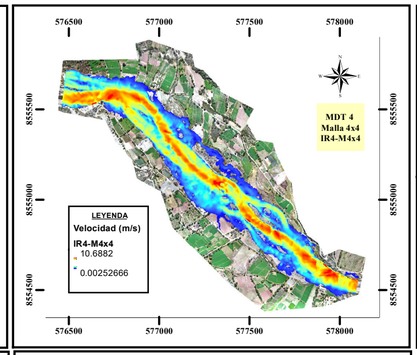


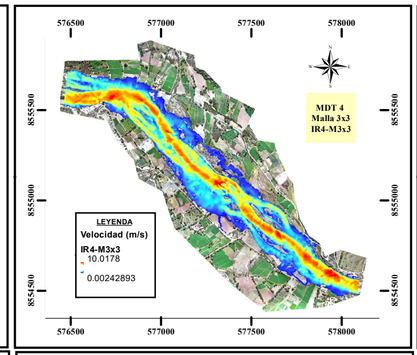


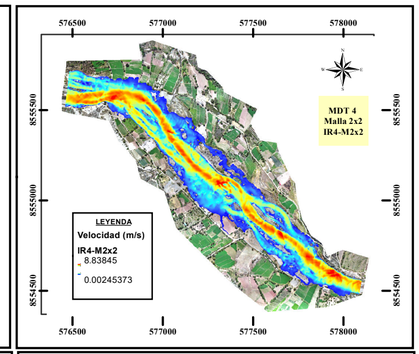


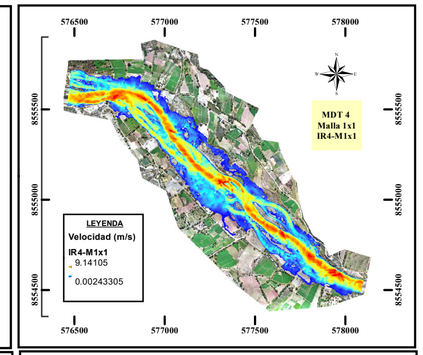


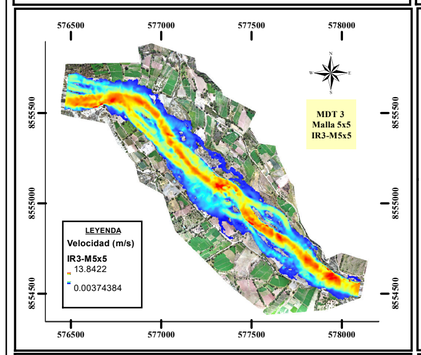


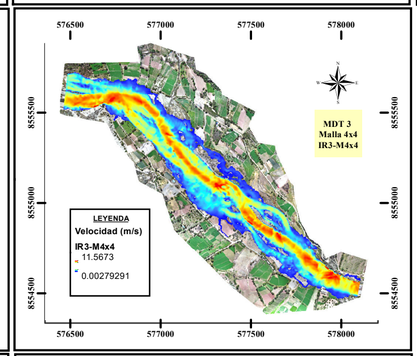


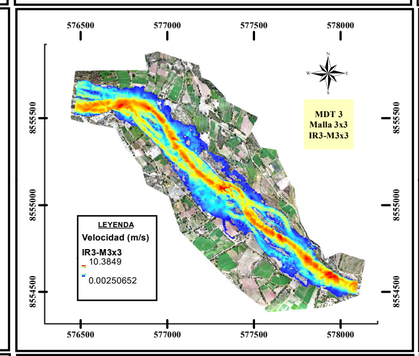


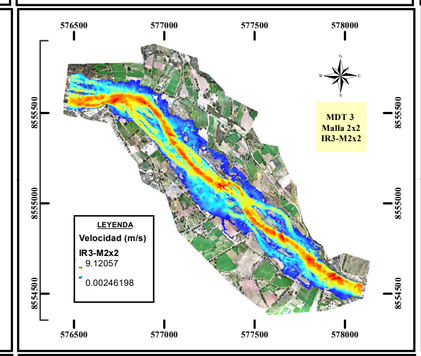


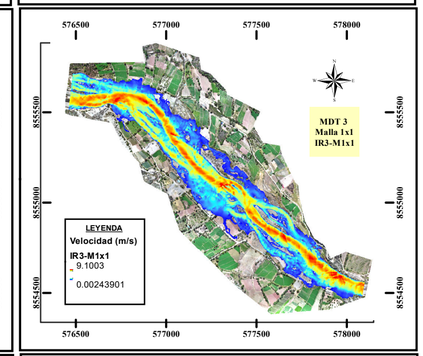


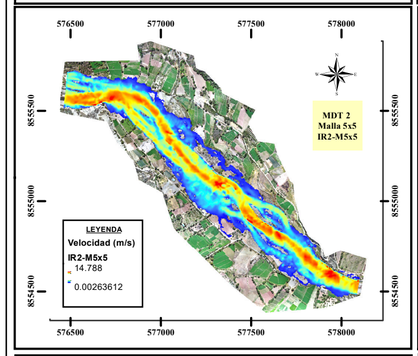


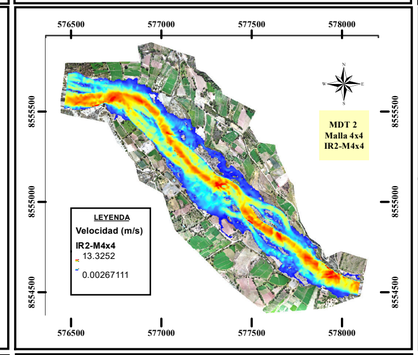


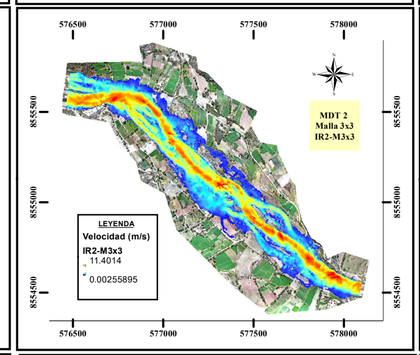


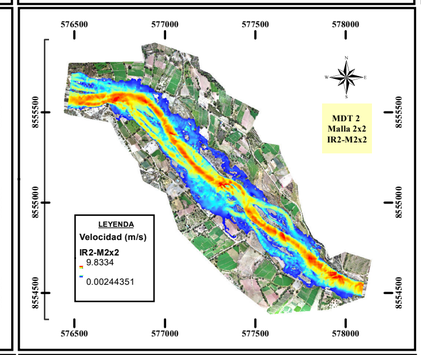


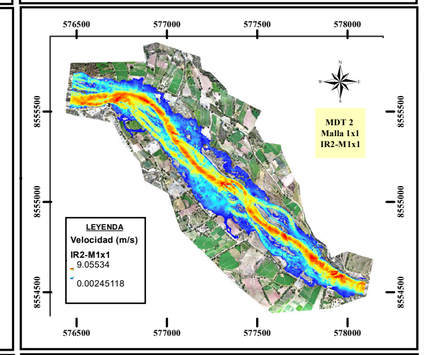


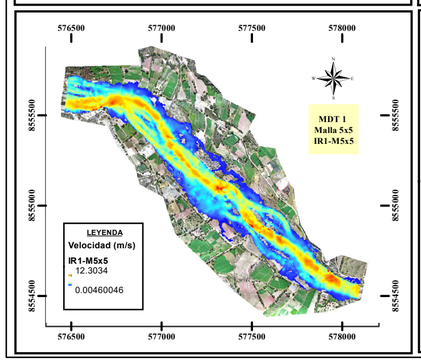


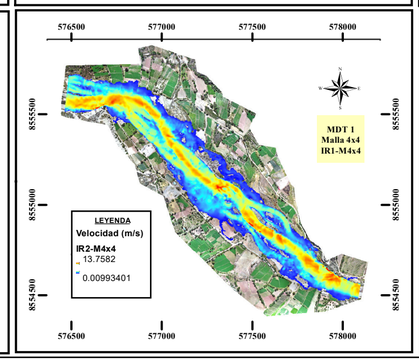


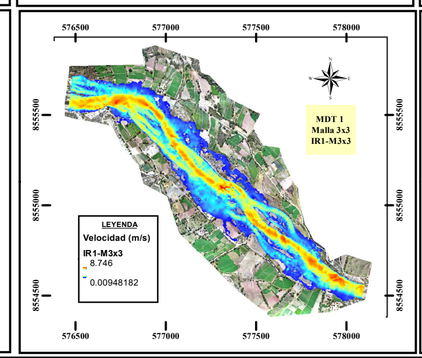


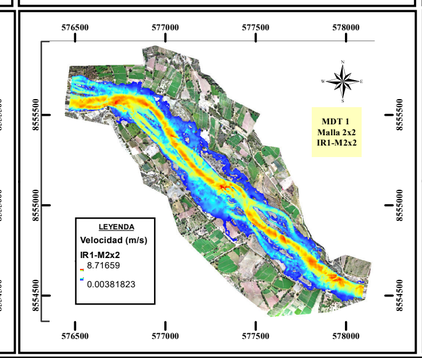


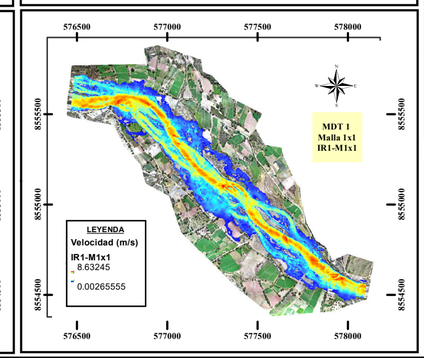












MDT	Tamaño de malla	Codigo	Velocidad maxima (m/s)	Velocidad minima (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
1	1x1	IR1-M1x1	8.63	0.00266	4.32
	2x2	IR1-M2x2	8.72	0.00382	4.36
	3x3	IR1-M3x3	8.75	0.00948	4.38
	4x4	IR1-M4x4	13.76	0.00267	6.88
	5x5	IR1-M5x5	13.13	0.00460	6.57
2	1x1	IR2-M1x1	9.06	0.00245	4.53
	2x2	IR2-M2x2	9.83	0.00244	4.92
	3x3	IR2-M3x3	11.40	0.00256	5.70
	4x4	IR2-M4x4	13.33	0.00267	6.66
	5x5	IR2-M5x5	14.79	0.00264	7.40
3	1x1	IR3-M1x1	9.10	0.00244	4.55
	2x2	IR3-M2x2	9.12	0.00246	4.56
	3x3	IR3-M3x3	10.38	0.00251	5.19
	4x4	IR3-M4x4	11.57	0.00279	5.79
	5x5	IR3-M5x5	13.84	0.00374	6.92
4	1x1	IR4-M1x1	9.14	0.00243	4.57
	2x2	IR4-M2x2	8.84	0.00245	4.42
	3x3	IR4-M3x3	10.02	0.00243	5.01
	4x4	IR4-M4x4	10.69	0.00253	5.35
	5x5	IR4-M5x5	16.89	0.00278	8.45
5	1x1	IR5-M1x1	9.06	0.00240	4.53
	2x2	IR5-M2x2	8.83	0.00234	4.42
	3x3	IR5-M3x3	11.21	0.00245	5.61
	4x4	IR5-M4x4	9.27	0.00178	4.64
	5x5	IR5-M5x5	18.60	0.00249	9.30

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Proyecto:

Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho – Ayacucho 2025

Ubicación
Departamento : Ayacucho
Provincia : Huamanga
Distrito : San Jose de Ticllas
Localidad : Valle Antacucho

Coordenadas: WGS-1984 UTM-18S

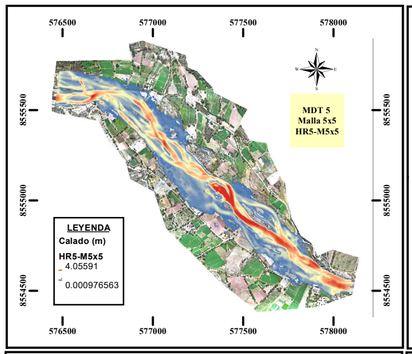
Plano: Velocidad - Iber

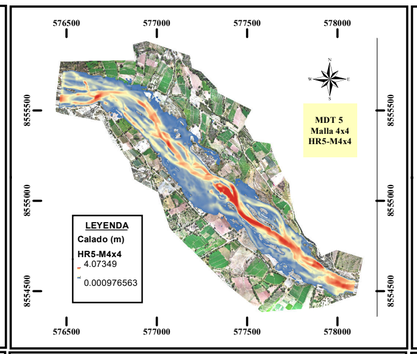
Lamina: V-I

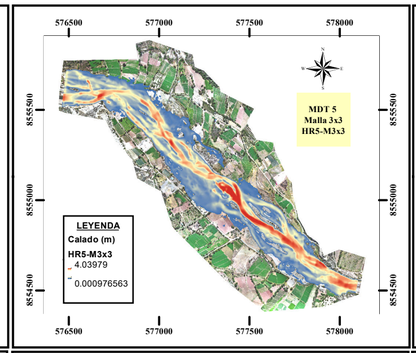
Escala: 1/25000

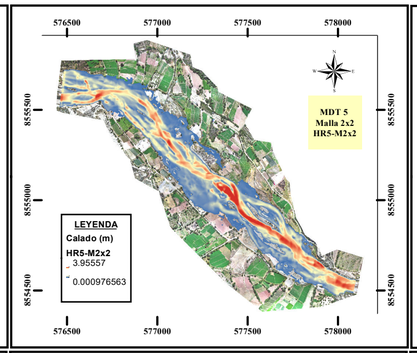
Fecha: Mayo-2026

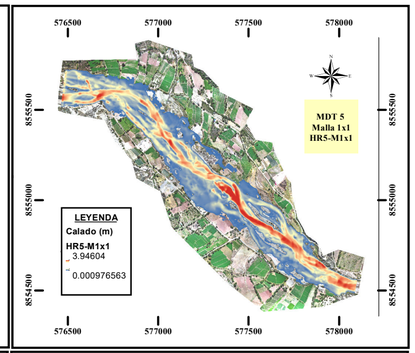
Dibujo: Maycol Espino Cayllahua

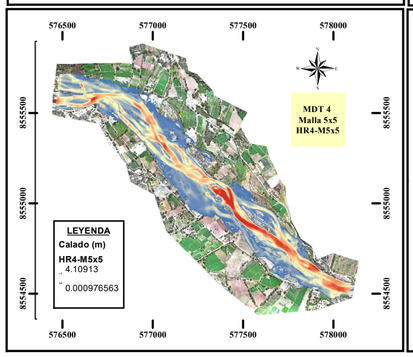


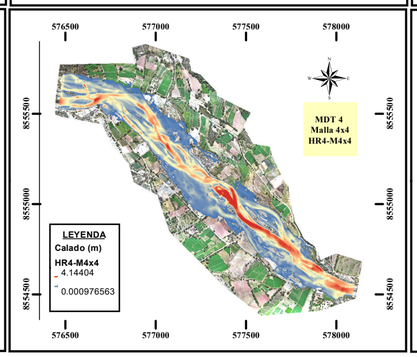


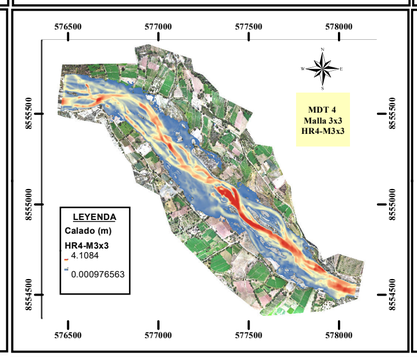


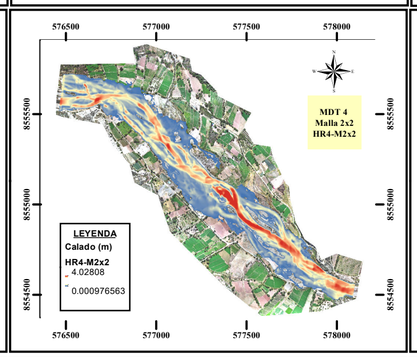


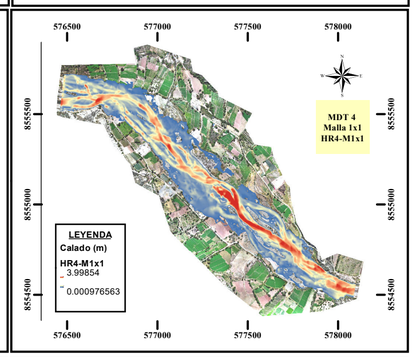


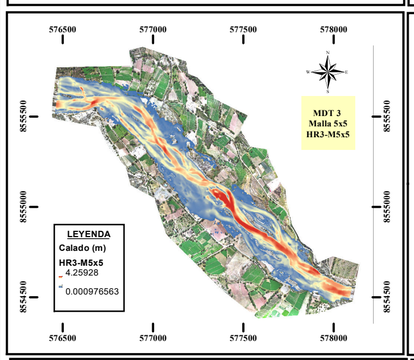


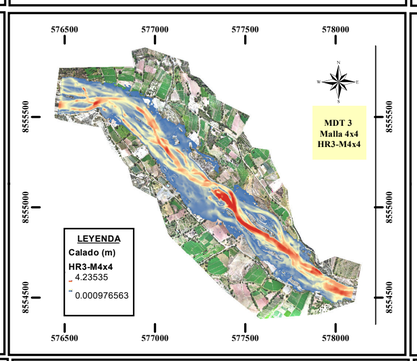


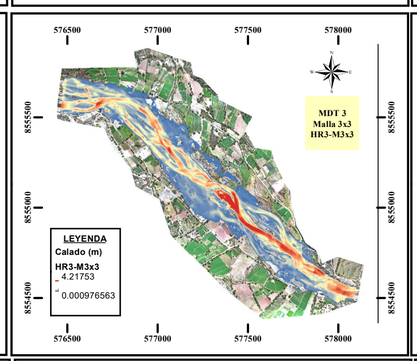


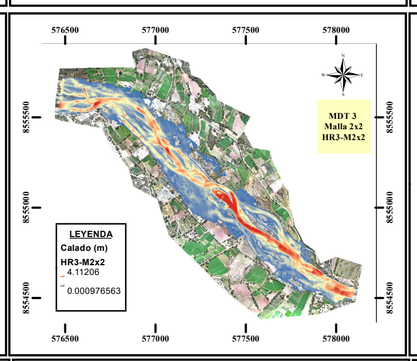


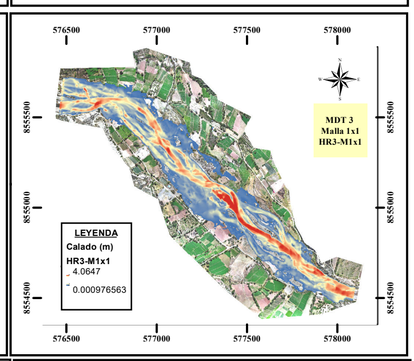


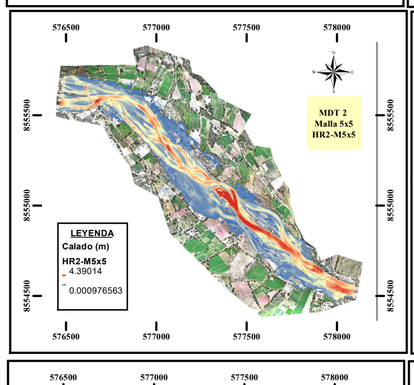


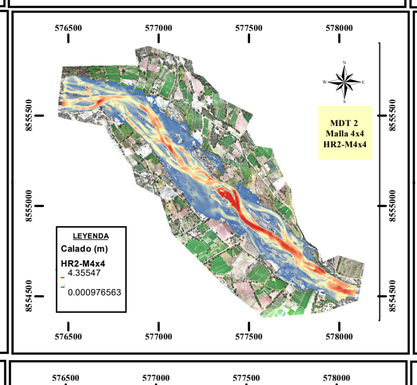


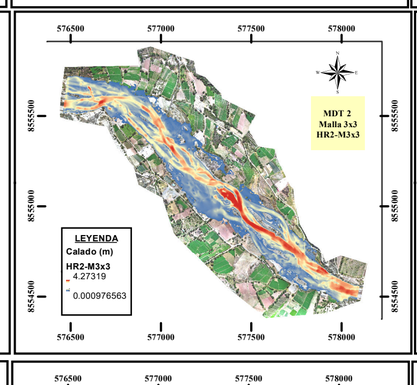


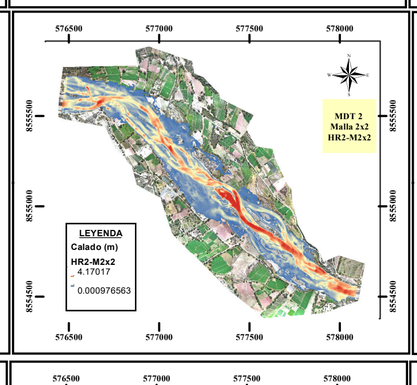


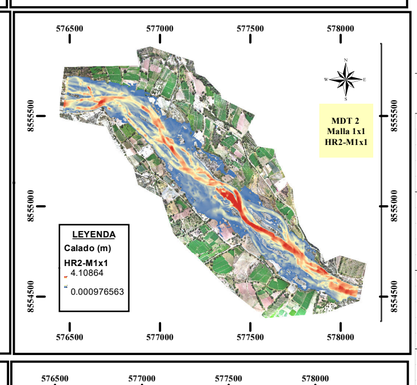


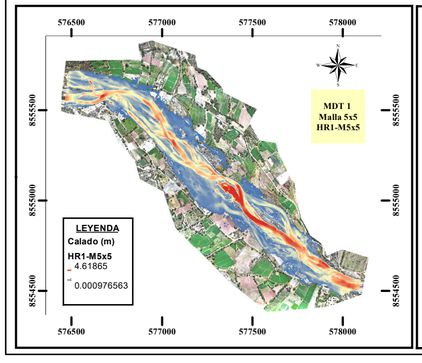


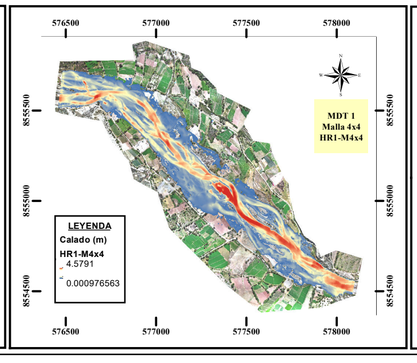


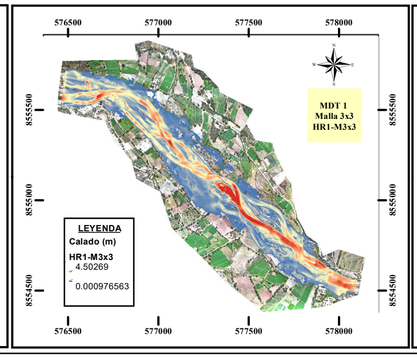


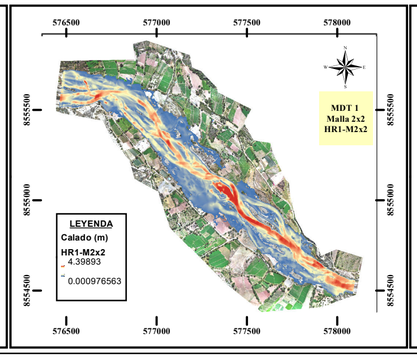


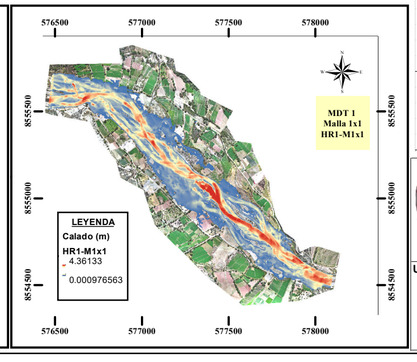












MDT	Tamaño de malla	Código	Calado máximo (m)	Calado Mínimo (m)	Calado promedio (m)
1	1x1	HR1-M1x1	4.36	0.00098	2.18
	2x2	HR1-M2x2	4.40	0.00098	2.20
	3x3	HR1-M3x3	4.50	0.00098	2.25
	4x4	HR1-M4x4	4.58	0.00098	2.29
	5x5	HR1-M5x5	4.62	0.00098	2.31
2	1x1	HR2-M1x1	4.11	0.00098	2.05
	2x2	HR2-M2x2	4.17	0.00098	2.09
	3x3	HR2-M3x3	4.27	0.00098	2.14
	4x4	HR2-M4x4	4.36	0.00098	2.18
	5x5	HR2-M5x5	4.39	0.00098	2.20
3	1x1	HR3-M1x1	4.06	0.00098	2.03
	2x2	HR3-M2x2	4.11	0.00098	2.06
	3x3	HR3-M3x3	4.22	0.00098	2.11
	4x4	HR3-M4x4	4.24	0.00098	2.12
	5x5	HR3-M5x5	4.26	0.00098	2.13
4	1x1	HR4-M1x1	4.00	0.00098	2.00
	2x2	HR4-M2x2	4.03	0.00098	2.01
	3x3	HR4-M3x3	4.11	0.00098	2.05
	4x4	HR4-M4x4	4.14	0.00098	2.07
	5x5	HR4-M5x5	4.11	0.00098	2.06
5	1x1	HR5-M1x1	3.95	0.00098	1.97
	2x2	HR5-M2x2	3.96	0.00098	1.98
	3x3	HR5-M3x3	4.04	0.00098	2.02
	4x4	HR5-M4x4	4.07	0.00098	2.04
	5x5	HR5-M5x5	4.06	0.00098	2.03

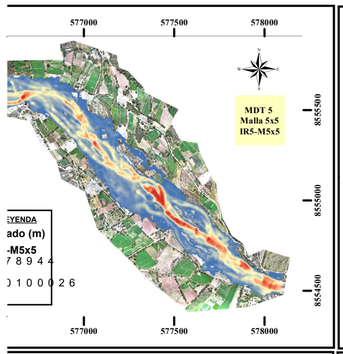
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

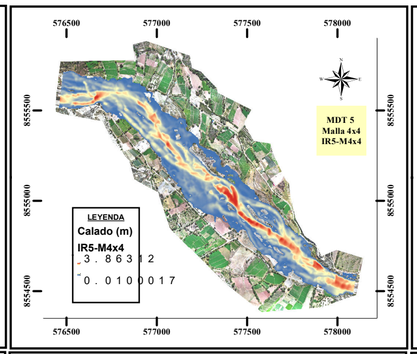
Proyecto:

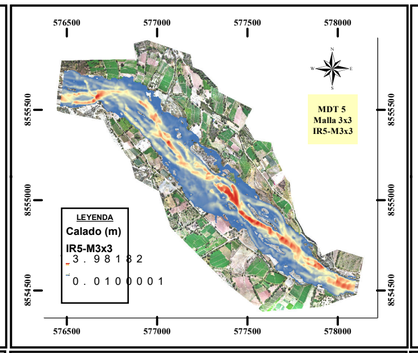
Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho – Ayacucho 2025

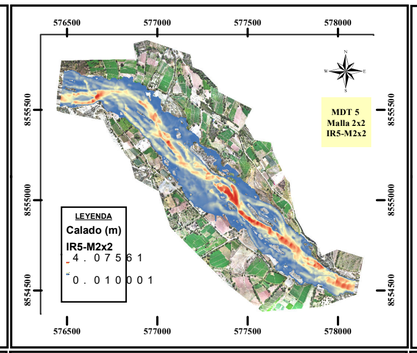
Ubicación
Departamento : Ayacucho
Provincia : Huamanga
Distrito : San Jose de Ticllas
Localidad : Valle Antacucho

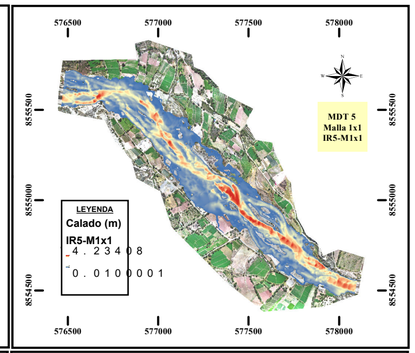
Coordenadas: WGS-1984 UTM-18S
Plano: Calado - HEC-RAS
Escala: 1/25000
Fecha: Mayo-2026
Dibujo: Maycol Espino Cayllahua
Lamina: C-H

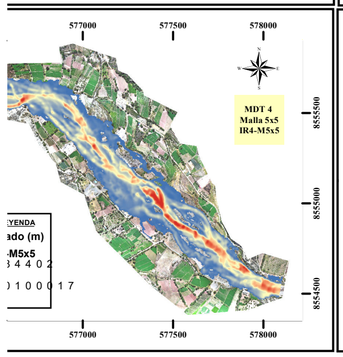


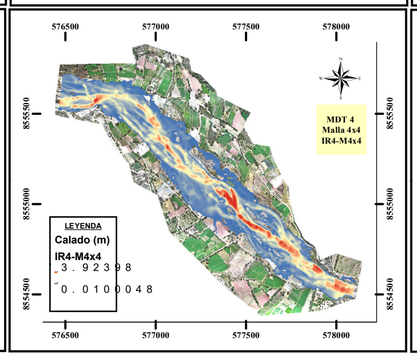


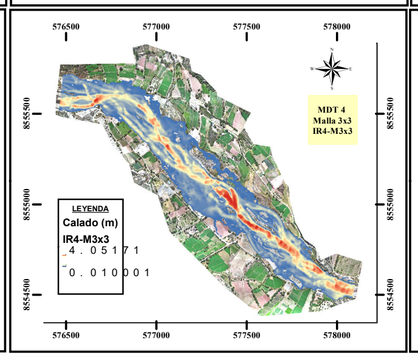


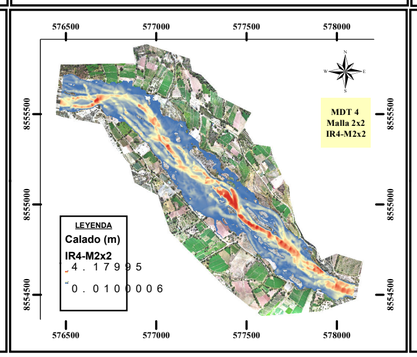


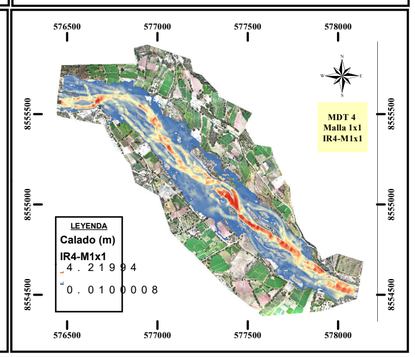


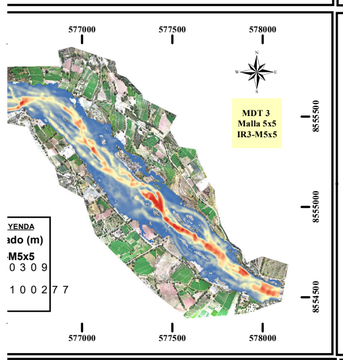


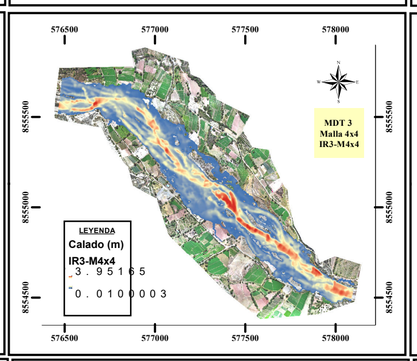


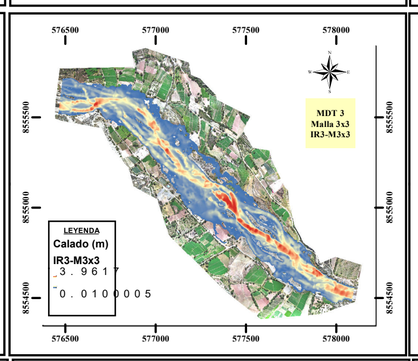


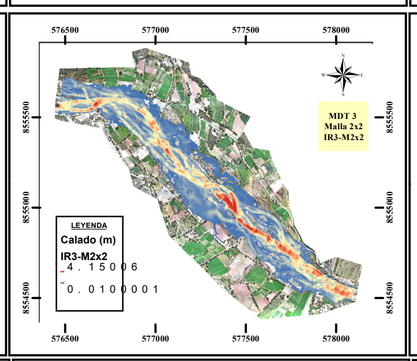


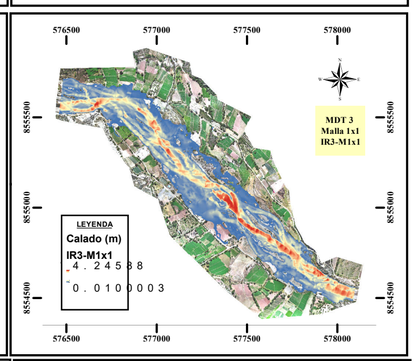


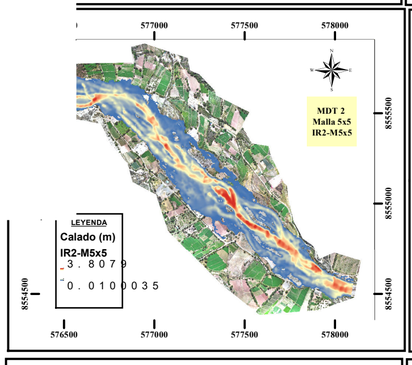


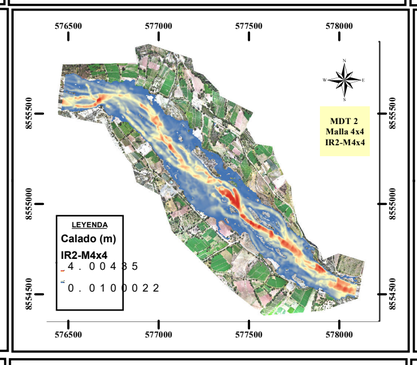


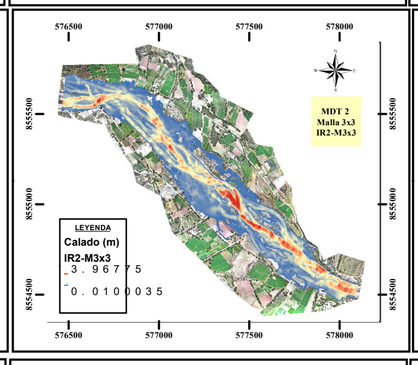


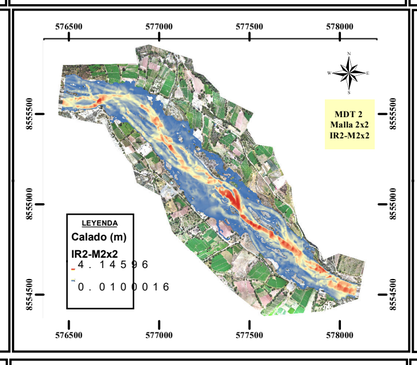


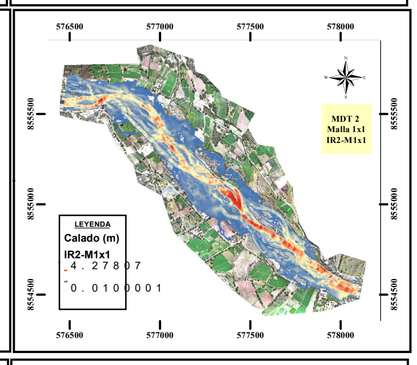


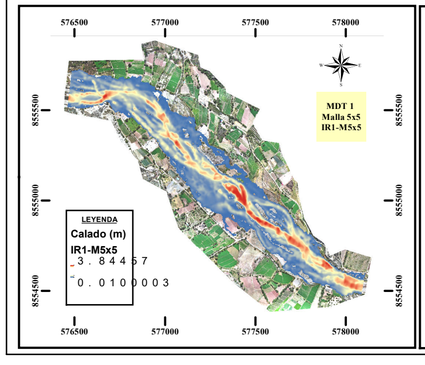


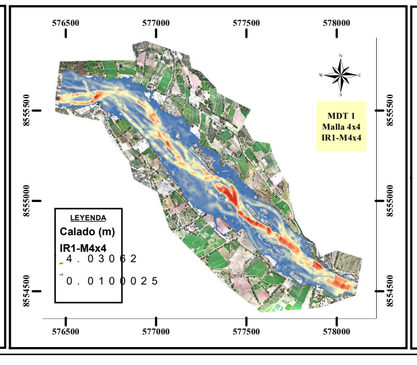


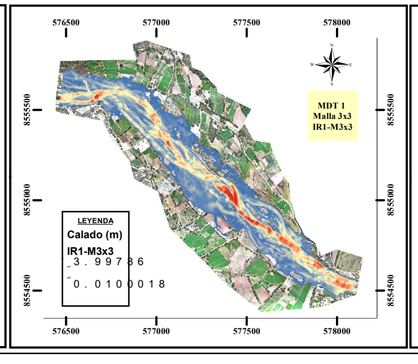


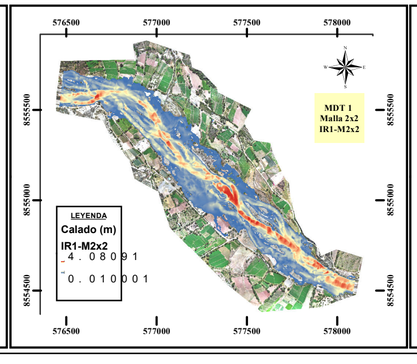


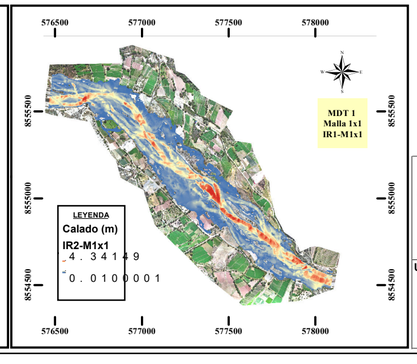












MDT	Tamaño de malla	Codigo	Calado máximo (m)	Calado Minimo (m)	Calado promedio (m)
1	1 x1	I R 1 - M 1 x1	4.34	0.01000	2.18
	2 x2	I R 1 - M 2 x2	4.08	0.01000	2.05
	3 x3	I R 1 - M 3 x3	4.00	0.01000	2.00
	4 x4	I R 1 - M 4 x4	4.03	0.01000	2.02
	5 x5	I R 1 - M 5 x5	3.84	0.01000	1.93
2	1 x1	I R 2 - M 1 x1	4.28	0.01000	2.14
	2 x2	I R 2 - M 2 x2	4.15	0.01000	2.08
	3 x3	I R 2 - M 3 x3	3.97	0.01000	1.99
	4 x4	I R 2 - M 4 x4	4.00	0.01000	2.01
	5 x5	I R 2 - M 5 x5	3.81	0.01000	1.91
3	1 x1	I R 3 - M 1 x1	4.25	0.01000	2.13
	2 x2	I R 3 - M 2 x2	4.15	0.01000	2.08
	3 x3	I R 3 - M 3 x3	3.96	0.01000	1.99
	4 x4	I R 3 - M 4 x4	3.95	0.01000	1.98
	5 x5	I R 3 - M 5 x5	3.80	0.01003	1.91
4	1 x1	I R 4 - M 1 x1	4.22	0.01000	2.11
	2 x2	I R 4 - M 2 x2	4.18	0.01000	2.09
	3 x3	I R 4 - M 3 x3	4.05	0.01000	2.03
	4 x4	I R 4 - M 4 x4	3.92	0.01000	1.97
	5 x5	I R 4 - M 5 x5	3.84	0.01000	1.93
5	1 x1	I R 5 - M 1 x1	4.23	0.01000	2.12
	2 x2	I R 5 - M 2 x2	4.08	0.01000	2.04
	3 x3	I R 5 - M 3 x3	3.98	0.01000	2.00
	4 x4	I R 5 - M 4 x4	3.86	0.01000	1.94
	5 x5	I R 5 - M 5 x5	3.79	0.01000	1.90

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Proyecto: Análisis de la influencia de la resolución del MDT en mallas FDM y FVM, Valle Antaccucho – Ayacucho

Ubicación	Coordenadas:	Plano:	Lamina:
Departamento: Ayacucho Provincia: Huamanga Distrito: San Jose de Ticllas Localidad: Valle Antaccucho	WGS-1984 UTM-18S Escala: 1 / 25000	Calado - Iber Fecha: Mayo- 2021	C-I Dibujo: Maycol Espino Caylla Huaman

UNSCH FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. MAYCOL ESPINO CAYLLAHUA

R.D. N° 339-2026-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho, a los veinte días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las dieciséis horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Ph.D. Sandra Del Águila Ríos, M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán como asesor, Dr. Eleazar Chuchón Angulo y el Ing. Efraín Chuchón Prado; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Análisis de la influencia de la resolución del MDT en la simulación de inundaciones con mallas FDM y FVM, Valle Antacucho - Ayacucho 2025**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **MAYCOL ESPINO CAYLLAHUA.**

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos	16	16	18	17
M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán	16	16	16	16
Dr. Eleazar Chuchón Angulo	17	17	17	17
Ing. Efraín Chuchón Prado	17	17	17	17
PROMEDIO GENERAL				**17**

Observaciones: Por acuerdo unánime de los miembros del jurado, el título del trabajo de investigación debe ser: **Análisis de la influencia de la resolución del modelo digital de terreno en la simulación de inundaciones con HEC-RAS e IBER, valle Antacucho - Ayacucho 2025**

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

.....
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos
Presidente

.....
M.Sc. César Vidal Gutiérrez Ninahuamán
Asesor

.....
Dr. Eleazar Chuchón Angulo
Jurado

.....
Ing. Efraín Chuchón Prado
Jurado

.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por **R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-CF**; hace constar que el trabajo titulado:

Análisis de la influencia de la resolución del modelo digital de terreno en la simulación de inundaciones con HEC-RAS e IBER, valle Antacucho – Ayacucho 2025

Autor : Maycol Espino Cayllahua
Asesor : César Vidal Gutiérrez Ninahuamán

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobado mediante RCU 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de **seis (6%)** de índice de similitud, con exclusión de citas y bibliografía, y de coincidencias menores de 30 palabras.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 3002652817

Ayacucho, 24 de Julio de 2026

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Prof. Dr. Eleazar Chuchón Angulo
DNI 42682714

Análisis de la influencia de la resolución del modelo digital de terreno en la simulación de inundaciones con HEC-RAS e IBER, valle Antacucho – Ayacucho 2025

por MAYCOL ESPINO CAYLLAHUA

Fecha de entrega: 24-jul-2026 07:19a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 3002652817
Nombre del archivo: Tesis-MEC-revA.pdf (33.9M)
Total de palabras: 29549
Total de caracteres: 154672

Análisis de la influencia de la resolución del modelo digital de terreno en la simulación de inundaciones con HEC-RAS e IBER, valle Antacucho - Ayacucho 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%	6%	2%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1%
4	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.escuelaing.edu.co Fuente de Internet	<1%
6	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1%
7	gredos.usal.es Fuente de Internet	<1%
8	Markovic, D.. "On micro-macro interface conditions for micro scale based FEM for inelastic behavior of heterogeneous materials", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 20041203 Publicación	<1%
9	www.icgc.cat Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to Universidad Internacional de la Rioja Trabajo del estudiante	<1%
13	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1%
14	www.campustudionline.com Fuente de Internet	<1%

15	pdffox.com Fuente de Internet	<1%
16	issuu.com Fuente de Internet	<1%

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		

Análisis de la influencia de la resolución del modelo digital del terreno en la simulación de inundaciones con HEC-RAS e IBER, valle Antacucho – Ayacucho 2025

Analysis of the influence of Digital Terrain Model resolution on flood simulation using HEC-RAS and IBER: Antacucho Valley – Ayacucho 2025

Maycol Espino Cayllahua[1] maycol.espino.21@unsch.edu.pe
César Vidal Gutiérrez Ninahuamán[2] cesar.gutierrez@unsch.edu.pe

Área de investigación: Medio ambiente
Línea de investigación: Hidrología e hidráulica

RESUMEN

El modelamiento hidráulico bidimensional constituye una herramienta fundamental para la evaluación de inundaciones, cuya confiabilidad depende, entre otros factores, de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de la malla computacional. La presente investigación tuvo como objetivo analizar la influencia de la resolución del MDT y del tamaño de malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER en el valle Antacucho – Ayacucho. La metodología consistió en desarrollar modelos hidráulicos utilizando cinco resoluciones del MDT y cinco tamaños de malla, generando un total de 50 simulaciones. La evaluación se realizó mediante el Índice de Convergencia de Malla (GCI), el orden de convergencia, la relación de convergencia asintótica y las variables hidráulicas profundidad máxima, velocidad máxima y área inundada, además del tiempo de procesamiento y el costo computacional. Los resultados evidenciaron que, en HEC-RAS, los MDT de 1,3 y 4 m presentaron una convergencia más cercana al régimen asintótico, mientras que el MDT de 5 m mostró comportamiento oscilatorio y menor consistencia numérica. En IBER, el MDT de 3 m presentó una convergencia más consistente y mejor adaptación a la geometría del terreno. Asimismo, la profundidad y el área inundada mostraron un comportamiento más consistente que la velocidad máxima, la cual resultó ser la variable más sensible a la discretización espacial. Las simulaciones en IBER demandaron, en promedio, 5,49 veces más tiempo de procesamiento que HEC-RAS, mientras que aumentar el tamaño de malla de 1×1 m a 2×2 m redujo el tiempo de procesamiento en 82,63 %, sin afectar significativamente la consistencia de los resultados. Se concluye que un MDT de 3 m y una malla de 2×2 m ofrecen el mejor equilibrio entre estabilidad numérica, representación hidráulica y eficiencia computacional para la modelación bidimensional de inundaciones en el valle de Antacucho.

Palabras clave: Modelamiento hidráulico bidimensional; Modelo Digital del Terreno (MDT); Mallas estructuradas; Mallas no estructuradas; Convergencia numérica; Estabilidad numérica; Eficiencia computacional; HEC-RAS; IBER.

ABSTRACT

Two-dimensional hydraulic modeling is a fundamental tool for flood assessment; its reliability depends on factors such as the resolution of the Digital Terrain Model (DTM) and the size of the computational mesh. This study aimed to analyze the influence of DTM resolution and mesh size on 2D flood simulations using HEC-RAS 2D and IBER in the Antacucho valley (Ayacucho). The methodology involved developing hydraulic models using five DTM resolutions and five mesh sizes, resulting in a total of 50 simulations. Evaluation was based on the Grid Convergence Index (GCI), order of convergence, asymptotic convergence ratio, and hydraulic variables—specifically maximum depth, maximum velocity, and flooded area—alongside processing time and computational cost. Results showed that in HEC-RAS, 1 m, 3 m, and 4 m DTMs exhibited convergence closer to the asymptotic regime, whereas the 5 m DTM displayed oscillatory behavior and lower numerical consistency. In IBER, the 3 m DTM demonstrated more consistent convergence and better adaptation to the terrain geometry. Furthermore, depth and flooded area showed more consistent behavior than maximum velocity, which proved to be the variable most sensitive to spatial discretization. On average, IBER simulations required 5.49 times more processing time than HEC-RAS, while increasing the mesh size from 1×1 m to 2×2 m reduced processing time by 82.63% without significantly affecting result consistency. It is concluded that a 3 m DTM and a 2×2 m mesh offer the best balance between numerical stability, hydraulic representation, and computational efficiency for 2D flood modeling in the Antacucho valley.

Keywords: Two-dimensional hydraulic modeling; Digital Terrain Model (DTM); Structured meshes; Unstructured meshes; Numerical convergence; Numerical stability; Computational efficiency; HEC-RAS; IBER.

Escuela profesional de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2].

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los eventos de inundación han generado significativos impactos sociales, económicos y ambientales, especialmente en zonas vulnerables como los valles interandinos del Perú. La modelación hidráulica se ha consolidado como una herramienta fundamental para la prevención y gestión de riesgos de inundación, permitiendo simular escenarios de flujo y estimar áreas potencialmente afectadas bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más recurrentes y de mayores consecuencias a nivel mundial, afectando vidas humanas, infraestructura, producción agrícola y el equilibrio ambiental (Smith & Ward, 1998). En zonas como el valle Antacucho – Ayacucho, caracterizado por su topografía montañosa y su alta variabilidad climática, los eventos de inundación representan un riesgo latente, especialmente en periodos de lluvias intensas y crecidas súbitas.

La confiabilidad de las simulaciones hidráulicas bidimensionales depende de la resolución del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del tamaño de la malla computacional, ya que ambos influyen en la representación de la topografía y en variables como la profundidad, la velocidad del flujo, la extensión de la inundación y el tiempo de procesamiento. Los modelos HEC-RAS 2D e IBER permiten desarrollar estas simulaciones mediante mallas estructuradas y no estructuradas, por lo que resulta necesario evaluar la influencia de estas configuraciones en los resultados hidráulicos y en la eficiencia computacional, especialmente en cuencas con relieve complejo como el valle Antacucho.

Frente a esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital de Terreno (MDT) y del tamaño de la malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER, utilizando mallas estructuradas y no estructuradas, respectivamente, en el valle Antacucho – Ayacucho. Para ello, se evaluarán parámetros hidráulicos como la profundidad máxima, la velocidad máxima, el área inundada y el tiempo de procesamiento, considerando diferentes resoluciones del MDT y tamaños de malla. Los resultados permitirán establecer criterios técnicos sobre la influencia de estas variables en el comportamiento de los modelos hidráulicos y en su eficiencia computacional, contribuyendo a la selección de configuraciones adecuadas para estudios de inundación en zonas con características similares.

II. METODOLOGÍA

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Analizar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de malla en la simulación bidimensional de inundaciones mediante HEC-RAS 2D e IBER, en el valle Antacucho – Ayacucho, 2025.

2.1.2. Objetivos específicos

Elaborar y simular modelos hidráulicos a diferentes resoluciones del modelo digital de terreno (MDT) haciendo el uso de las mallas estructuradas (HEC - RAS) y mallas no estructuradas (IBER).

Comparar y evaluar las características hidráulicas y el tiempo de procesamiento por cada modelo hidráulico elaborado a distintas resoluciones del modelo digital de elevaciones (MDT).

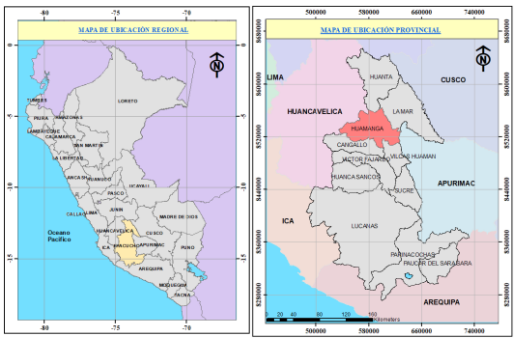
Identificar la resolución del MDT, el tamaño de malla y el modelo hidráulico que presenten el mejor equilibrio entre la consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

2.2. Zona de estudio

El valle de Antacucho, se encuentra ubicado en la parte noroeste de la provincia de Huamanga a 26.4 km de la ciudad de Ayacucho, vía PE-26B Ayacucho – San José de Ticllas a 2435 m.s.n.m.

El tramo de estudio corresponde a un sector del rio ubicado en el valle de Antacucho con una longitud aproximada de 2.08 km.

Figura 1.
Ubicación departamental, provincial y distrital del área de estudio.



Escuela profesional de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2].

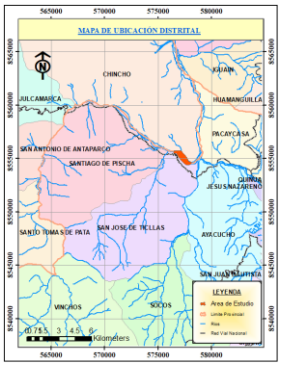


Figura 2.
Área de estudio valle Antacucho



2.3. Materiales y equipos

2.3.1. Materiales y equipos en campo

- Flexómetro
- Libreta de campo
- Casco
- Chaleco
- GPS Diferencial SOUTH Galaxy G3
- Aeronave no tripulada AUTEL EVO II PRO RTK
- Cámara fotográfica

2.3.2. Materiales y equipos en gabinete

- Laptop Intel Core i5 16GB de RAM
- Computadora Intel Core i7 16GB de RAM
- Impresora multifunción
- Papel bond A4 y A3
- Lapiceros

2.3.3. Programas

- Microsoft Office
- AutoCAD Civil 3D 2023
- ArcGIS 10.8.0
- Google Earth
- QGIS 3.44.9
- HEC-RAS 6.7 Beta 4a
- IBER 3.3.1
- Agisoft Metashape Professional 2.0.0

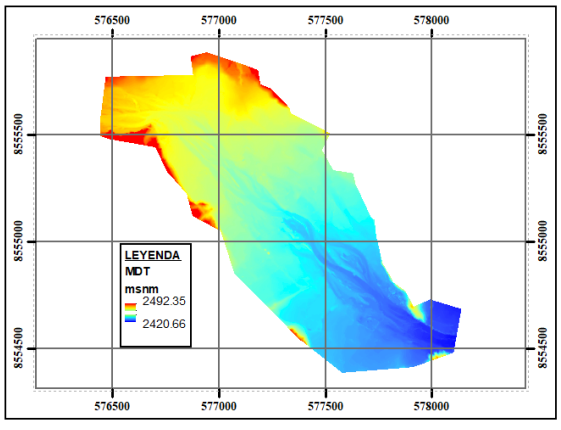
2.4. Metodología.

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y nivel explicativo, con un diseño no experimental. Se elaboraron Modelos Digitales del Terreno (MDT) con resoluciones de 1, 2, 3, 4 y 5 m, a partir de un levantamiento fotogramétrico con dron. Posteriormente, se realizaron simulaciones bidimensionales de inundación en HEC-RAS 2D e IBER empleando diferentes tamaños de malla (1×1, 2×2, 3×3, 4×4 y 5×5 m), utilizando un mismo caudal de entrada y condiciones hidráulicas. Se evaluó la influencia de la resolución del MDT y del tamaño de malla mediante la comparación del calado máximo, área inundada, velocidad, tiempo de procesamiento y análisis de convergencia de malla utilizando el Índice de Convergencia de Malla (GCI), con el fin de identificar la configuración que proporciona el mejor equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

2.4.1. MDT (Modelo digital de terreno)

El Modelo Digital del Terreno (MDT) es la representación digital de la superficie del terreno, libre de vegetación, edificaciones y otros objetos. En esta investigación, el MDT se obtuvo mediante un levantamiento fotogramétrico realizado con un dron y fue procesado en Agisoft Metashape, generándose un modelo con una resolución espacial original de 0.49 m/píxel que cubrió un área de 1.10 km² (110 ha) correspondiente al valle Antacucho. A partir de este modelo se generaron MDT con resoluciones de 1, 2, 3, 4 y 5 m, los cuales se utilizaron como base para las simulaciones bidimensionales de inundación en HEC-RAS 2D e Iber, con el fin de evaluar la influencia de la resolución del terreno en los resultados hidráulicos y en el desempeño computacional de los modelos.

Figura 3.
Modelo digital de terreno (MDT)



2.4.2. Datos hidrológicos de caudal máximo

Los datos hidrológicos empleados en la investigación corresponden al caudal de entrada utilizado para las simulaciones bidimensionales. Se adoptó un caudal de 749 m³/s, correspondiente a un

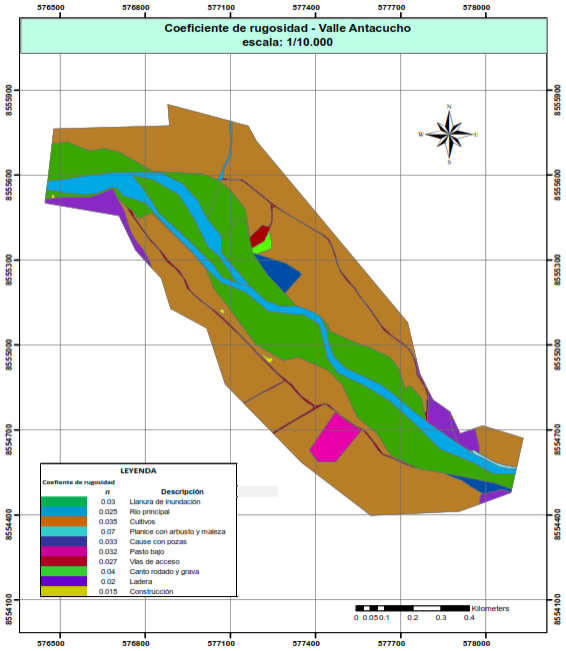
Escuela profesional de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2].

periodo de retorno de 100 años (T = 100 años), obtenido del estudio hidrológico desarrollado en la investigación de (Fernandez, 2016) sobre la cuenca del río Cachi. Este caudal se utilizó como condición de frontera de entrada en HEC-RAS 2D e Iber, permitiendo evaluar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de malla sobre los resultados hidráulicos de la simulación de inundaciones.

2.4.3. Rugosidad del rio Cachi

Los datos hidrológicos empleados en la investigación corresponden al caudal de entrada utilizado para las simulaciones bidimensionales. Se adoptó un caudal de 749 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno de 100 años (T = 100 años), obtenido del estudio hidrológico desarrollado en la investigación de Huamán Ccanto (2023) sobre la cuenca del río Cachi. Este caudal se utilizó como condición de frontera de entrada en HEC-RAS 2D e Iber, permitiendo evaluar la influencia de la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y del tamaño de malla sobre los resultados hidráulicos de la simulación de inundaciones.

Figura 4.
Valores de coeficiente de rugosidad (n)



2.4.4. Modelamiento hidráulico en HEC-RAS 2D

El modelamiento hidráulico se realizó en HEC-RAS 2D sobre un dominio de simulación de 0.59 km² (59 ha), utilizando Modelos Digitales del Terreno (MDT) con resoluciones de 1, 2, 3, 4 y 5 m y mallas estructuradas de 1×1, 2×2, 3×3, 4×4 y 5×5 m. Se aplicó un caudal de entrada de 749 m³/s, se definieron las condiciones de frontera y la rugosidad mediante el coeficiente de Manning. El tiempo total de simulación fue de 30 minutos, con un intervalo de cálculo de 1 segundo y un numero de Courant de 0.45, permitiendo obtener el calado, la velocidad, el área inundada y el tiempo de procesamiento.

2.4.5. Modelamiento hidráulico en IBER

El modelamiento hidráulico en Iber se desarrolló sobre un dominio de simulación de 0.59 km² (59 ha), empleando Modelos Digitales del Terreno (MDT) con resoluciones de 1, 2, 3, 4 y 5 m. Se generaron mallas no estructuradas triangulares con tamaños equivalentes de 1×1, 2×2, 3×3, 4×4 y 5×5 m, a las cuales se asignó la rugosidad mediante el coeficiente de Manning y un caudal de entrada de 749 m³/s. Las simulaciones tuvieron una duración de 30 minutos, con un intervalo de cálculo de 1 segundo y un número de Courant de 0.45, obteniéndose como resultados el calado, la velocidad, el área inundada y el tiempo de procesamiento.

2.4.6. Análisis de convergencia de malla

El análisis de convergencia de malla comprende el cálculo del orden de convergencia (p), el Índice de Convergencia de Malla (GCI) y la solución asintótica, utilizando como variables de evaluación el calado máximo, la velocidad máxima, el área inundada y el tiempo de procesamiento. Este procedimiento cuantifica la incertidumbre numérica y evalúa la influencia de la resolución del MDT y del tamaño de malla en la precisión y estabilidad de las simulaciones bidimensionales de inundación.

2.4.7. Análisis de costos incrementales computacionales.

El análisis de costos incrementales compara el tiempo de procesamiento asociado a las diferentes resoluciones del Modelo Digital del Terreno (MDT) y tamaños de malla utilizados en las simulaciones como indicador del costo computacional. Esta evaluación permite establecer la relación entre el incremento de la precisión hidráulica y los recursos computacionales requeridos, identificando la configuración con el mejor equilibrio entre precisión y eficiencia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

3.1. Evaluación de características hidráulicas

Del análisis del índice de convergencia de mallas el calado máximo presentó una baja sensibilidad a las variaciones en la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y el tamaño de malla, mientras que el área inundada mostró un comportamiento estable entre los diferentes escenarios evaluados. En contraste, la velocidad máxima fue la variable más sensible a la discretización espacial.

Escuela profesional de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2].

Tabla 1.
Evaluación comparativa de MDT

Resolución MDT	GCI promedio	Relación asintótica promedio	Orden observado (p)	Interpretación
HEC-RAS - Mallas estructuradas				
1 m	1.15%	0.99	1.98	Convergencia adecuada; incertidumbre baja.
2 m	3.68%	0.99	1.01	Convergencia lenta, pero estable.
3 m	1.90%	0.99	1.57	Convergencia adecuada y comportamiento consistente.
4 m	1.00%	1.00	1.96	Mejor estabilidad numérica; comportamiento cercano al esperado.
5 m	0.19%	1.11	4.26	GCI muy bajo, pero p superior al esperado; posible artefacto numérico.
IBER - Mallas no estructuradas				
1 m	7.37%	1.06	-2.235	Convergencia oscilatoria.
2 m	13.23%	1.03	0.585	Convergencia lenta; elevada incertidumbre.
3 m	4.40%	1.02	1.325	Convergencia adecuada y estable.
4 m	1.14%	1.01	2.275	Muy baja incertidumbre; p ligeramente superior al esperado.
5 m	9.26%	1.04	-1.025	Convergencia oscilatoria.

La Tabla 1 resume los indicadores de convergencia numérica para las diferentes resoluciones del MDT en HEC-RAS 2D e IBER. En HEC-RAS los MDT de 1m,3 m y 4 m presentan un comportamiento consistente, con valores bajos de GCI, relaciones de convergencia asintótica próximas a la unidad y órdenes observados acordes con el comportamiento esperado. En IBER, el MDT de 3 m muestra el comportamiento más consistente al integrar los tres indicadores, mientras que los MDT de 1 m y 5 m presentan convergencia oscilatoria y el MDT de 2 m evidencia una convergencia más lenta. En conjunto, el MDT de 3 m presenta un equilibrio favorable entre la incertidumbre por discretización, la proximidad al régimen asintótico y la estabilidad del orden observado de convergencia para las condiciones del presente estudio.

La sensibilidad de las variables hidráulicas frente a la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) fue diferente entre los parámetros evaluados. El calado máximo y el área inundada presentaron variaciones reducidas al modificar la resolución del MDT, evidenciando un comportamiento estable en ambos modelos hidráulicos. En contraste, la velocidad máxima mostró una mayor sensibilidad a la discretización topográfica, registrando variaciones más pronunciadas entre las resoluciones analizadas

3.2. Evaluación de tiempo de procesamiento

Tabla 2.
Tiempo de procesamiento entre mallas estructuradas y no estructuradas

Tamaño de malla	Tiempo de mallas no estructuradas (min)	Tiempo de mallas estructuradas (min)	Factor de incremento	Porcentaje de incremento
1	342.50	59.15	5.79	479%
2	69.42	11.87	5.85	485%
3	28.60	5.30	5.40	440%
4	16.25	3.08	5.27	427%
5	10.80	2.10	5.14	414%

De la tabla 2, la relación de incremento del tiempo de procesamiento de las mallas no estructuradas varía un promedio de 5.49 veces más con respecto a las mallas estructuradas, lo que representa aumentos entre 414 % y 485 %. Asimismo, se observa que, a medida que aumenta el tamaño de malla, la diferencia de tiempo entre ambos tipos de malla disminuye ligeramente. Esto evidencia que las mallas no estructuradas demandan un mayor tiempo de procesamiento debido al mayor número de elementos generados y a la complejidad geométrica de la discretización, lo que incrementa el esfuerzo computacional durante la resolución numérica del modelo.

3.3. Evaluación de costo computacional

Tabla 3.
Costo computacional de refinamiento en mallas no estructuradas

Tamaño de malla	Número de elementos	Razón efectiva	Factor de refinamiento	variación de costo computacional
1x1	1,360,887			1.0000
2x2	339,237	4.01		0.1732
3x3	150,461	2.25	2.40	0.0300
4x4	84,364	1.78		0.0052
5x5	53,999	1.56		0.0009

Tabla 4.
Costo computacional de refinamiento en mallas estructuradas

Tamaño de malla	Número de elementos	Razón efectiva	Factor de refinamiento	variación de costo computacional
1x1	590,739		2.40	1.0000

Escuela profesional de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Tesista[1] Asesor[2].

2x2	147,414	4.01		0.1732
3x3	65,383	2.25		0.0300
4x4	36,711	1.78		0.0052
5x5	23,454	1.57		0.0009

La evaluación de la variación del costo computacional en función del refinamiento de la malla se presenta en las Tablas 3 y 4 para las mallas estructuradas y no estructuradas. Los resultados muestran que, al incrementar el tamaño de la malla, disminuyen el número de elementos, la variación del costo computacional y el tiempo de procesamiento. Las mallas de 2×2 reducen aproximadamente un 82.63 % el tiempo de procesamiento respecto a las mallas de 1×1.

CONCLUSIONES

1. La resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) y el tamaño de malla influyen en el comportamiento de las simulaciones bidimensionales de inundación realizadas mediante HEC-RAS 2D e IBER. Las variaciones en la resolución del MDT modifican la representación del relieve y las variables hidráulicas simuladas, mientras que el tamaño de malla influye principalmente en la estabilidad numérica y en la demanda computacional. Los resultados obtenidos evidencian que la influencia de estos parámetros depende del modelo hidráulico utilizado y de las condiciones geomorfológicas del área de estudio.

2. Se desarrollaron satisfactoriamente los modelos hidráulicos bidimensionales en HEC-RAS 2D e IBER utilizando cinco resoluciones del MDT (1m, 2m, 3m, 4m y 5 m) y cinco tamaños de malla (1×1, 2×2, 3×3, 4×4 y 5×5) metros, permitiendo analizar la influencia de estos parámetros sobre el comportamiento hidráulico y numérico de las simulaciones. Los resultados evidenciaron que la resolución del MDT influye en la representación de la topografía y de las variables hidráulicas, mientras que el tamaño de malla condiciona el nivel de discretización espacial empleado por cada modelo.

3. La comparación y evaluación de las características hidráulicas demostraron que el calado máximo y el área inundada presentaron un comportamiento más estable a los cambios de resolución del MDT y tamaño de malla, mientras que la velocidad máxima es más sensible al refinamiento de la discretización. Se cuantificó que las mallas no estructuradas (IBER) demanda un promedio de 5.49 veces más tiempo que las mallas estructuradas (HEC-RAS). Se verificó además que el tiempo de procesamiento depende principalmente del tamaño de malla y no de la resolución del MDT.

4. La evaluación integrada de la convergencia numérica, las variables hidráulicas y la eficiencia computacional evidenció que el MDT de 3 m presentó un comportamiento consistente en ambos modelos hidráulicos. Asimismo, la malla de 2×2 m redujo el tiempo de procesamiento en 82.63 % respecto a la malla de 1×1 m, sin variaciones significativas en las variables hidráulicas. Para las condiciones del valle Antacucho, el MDT de 3 m, la malla de 2×2 m y las mallas no estructuradas (IBER) representaron un equilibrio favorable entre la consistencia numérica, la representación de las variables hidráulicas y la eficiencia computacional.

REFERENCIAS

Abily, M., Delestre, O., Gourbesville, P., Bertrand, N., Duluc, C.-M., & Richet, Y. (2016). Global sensitivity analysis with 2D hydraulic codes: Application on uncertainties related to high-resolution topographic data. *Springer Water*, 301–315. https://doi.org/10.1007/978-981-287-615-7_21

Agisoft LLC. (2024). *Agisoft Metashape user manual professional edition (version 2.3)*. https://www.agisoft.com

Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thieken, A. H. (2009). Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, *49*(1), 79–98. https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-008-9277-8

Ashgriz, N., & Mostaghimi, J. (2001). *An introduction to computational fluid dynamics*.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para*

Cálculo y Diseño En Ingeniería, *30*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/J.RIMNI.2012.07.004

Canchari, L. (2023). *Análisis comparativo del modelamiento hidráulico utilizando IBER y HEC-RAS para determinar áreas inundables en la Quebrada del Diablo, Región Tacna*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4375

Castedo, R., Reifarth, C., Santos, A. P., Losada, J., López, L. M., Chiquito, M., & Mancilla, J. M. (2019). Application of grid convergence index to shock wave validated with LS-DYNA and ProsAir. *Ingeniería e Investigación*, *39*(3), 20–26. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092019000300020&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Chaudhry, M. H. (2008). Open-channel flow: Second Edition. *Open-Channel Flow: Second Edition*, 1–523. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68648-6/SAVE-RESEARCH

Chavez, H. (2024). *Instructivo de prácticas de laboratorio de modelación numérica para analizar la hidrodinámica de cauces naturales: Instructivo de prácticas de laboratorio de modelación numérica para analizar la hidrodinámica de cauces naturales en dos dimensiones mediante el programa IBER*.

Chow, V. T. (1994). *Hidraulica de canales abiertos*.

Chow, V. T., & Maidment, D. R. (1998). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.

Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, *377*(1–2), 131–142. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.015

Fernández, J. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos : introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. https://books.google.com/books/about/T%C3%A9cnicas_num%C3%A9ricas_en_ingenier%C3%ADa_de_f.html?hl=es&id=-WGXtgAACAAJ

Fernández, L. A. (2016). *Comportamiento bidimensional para determinar mancha de inundación de la cuenca río Cachi - Sectores de Laramate Santiago de Pischa - Huamanga - Ayacucho* [Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3720

GEASIG. (2018). *IBER Y ARCGIS Modelización hidráulica bidimensional*.

Gomes, E., & Garcia, C. (2012). A finite element method based on capturing operator applied to wave propagation modeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *201–204*, 127–138. https://doi.org/10.1016/J.CMA.2011.10.006

Hernández, R., Fernádez, C., & Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación. *Metodología de La Investigación*, 1–634. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008&info=resumen&idioma=SPA

Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, *253*(1–4), 239–249. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00490-5

Huxley, C., Syme, B., Ryan, P., & Collecutt, G. (2022). *Hydraulic Modelling 2D Cell Size Result Convergence-Comparing the Performance of Different Shallow Water Equation Solution Schemes*.

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2004). Digital terrain modeling: Principles and methodology. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, 1–320. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203357132/digital-terrain-modeling-zhilin-li-christopher-zhu-chris-gold

Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación. *Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú*. https://doi.org/10.35622/INUDI.B.080

Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J. (2008). GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling and Software*, *23*(10–11), 1300–1311.

Morales, J., Pérez, J., & Delgado, F. (2018). *Comparación de modelos numéricos HEC-RAS e Iber en la modelación de inundaciones urbanas*. 105–117.

Orellana, R. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS*.

Roache, P. J. (1998). *Funadamentals of verification and validation*.

Schumann, G., Matgen, P., Hoffmann, L., Hostache, R., Pappenberger, F., & Pfister, L. (2007). Deriving distributed roughness values from satellite radar data for flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, *344*(1–2), 96–111. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2007.06.024

Sierra, H. (2018). *Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del rio Pativilca, en flujo no permanente* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. https://hdl.handle.net/20.500.12996/3545

Smith, K., & Ward, R. (1998). Floods: Physical processes and human impacts. *Book*, 394. https://www.wiley.com/en-us/Floods%3A+Physical+Processes+and+Human+Impacts-p-9780471952480

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, *90*, 201–216. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815216310040

Torres, C. A. B. (2010). Metodologia de la investigación para administración, economía, humanidades y ciencias sociales. In *Pautas para la redacción de manuscritos según el manual APA*. Pearson Prentice Hall. https://pure.unisabana.edu.co/es/publications/metodologia-de-la-investigaci%C3%B3n-para-administraci%C3%B3n-econom%C3%ADa-huma/

U.S. Army Corps of Engineers. (2025). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual* (Hydrologic Engineering Center, Ed.).

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.*

Xaman, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. https://books.google.com/books/about/Din%C3%A1mica_De_Fluidos_Computacional_Para.html?hl=es&id=dwIDDAAAQBAJ

Zapata Escudero, J. S. (2022). *Mapas de peligro por inundación del río Chibunga en el tramo de influencia al Parque Lineal ubicado en la ciudad de Riobamba: modelación hidrodinámica bidimensional del río Chibunga, en el tramo de influencia al parque lineal ubicado en la ciudad de Riob…*. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23010