

Flood analysis at different return times in the Mala River from the La Capilla hydrometric station using IBER and HEC-RAS

Jose Miller Diaz Mejia¹, Flor Jackelin Auris Mariscal², Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³, Ramos-Orlandino Carmela Cristhy, Magister en Ingeniería Hidráulica con mención en Hidráulica Computacional⁴

^{1,2,3,4}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U20201B992@upc.edu.pe, U20201B101@upc.edu.pe, pcciacar@upc.edu.pe, pccicram@upc.edu.pe

Abstract– The increase in global temperature is altering climate patterns, generating changes in watersheds that intensify phenomena such as floods. A notable case is the Mala River basin in Peru, which during the rainy season (December to April) faces extreme rainfall, especially due to the coastal Niño phenomenon. This has devastating consequences, such as crop damage and human loss. To evaluate the impact of these floods, an investigation was carried out with the objective of identifying flood-prone areas in the Mala River channel, downstream of the La Capilla hydrometric station, using two-dimensional models such as IBER and HEC-RAS. A JavaScript code was developed to obtain daily precipitation and temperature data from the ERA5 Land climate product. These data were integrated into the GR4J precipitation-runoff model, generating historical series of daily average flows from 1950 to 2024. Flood simulations were performed using the aforementioned models and compared with multispectral images. The results showed that the maximum instantaneous flow reached 235 m³/s for a return period of 10000 years. Furthermore, IBER showed larger flood areas than HEC-RAS in all evaluated return times, mainly affecting agricultural areas, which has a negative impact on the local economy and the quality of life of the population of the Mala district, especially in the lower part of the river.

Keywords– Mala River, IBER, HEC-RAS, flood.

Análisis de inundaciones a diferentes tiempos de retorno en el río Mala desde la estación hidrométrica La Capilla usando IBER y HEC-RAS

Jose Miller Diaz Mejia¹, Flor Jackelin Sorely Auris Mariscal², Carmona-Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³, Ramos-Orlandino Carmela Cristhy, Magister en Ingeniería Hidráulica con mención en Hidráulica Computacional⁴

^{1,2,3,4}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U20201B992@upc.edu.pe, U20201B101@upc.edu.pe, pcciacar@upc.edu.pe, pccicram@upc.edu.pe

Resumen—El aumento de la temperatura global está alterando los patrones climáticos, generando cambios en las cuencas hidrográficas que intensifican fenómenos como inundaciones. Un caso notable es la cuenca del río Mala en Perú, que durante la temporada de lluvias (diciembre a abril) enfrenta precipitaciones extremas, especialmente debido al fenómeno del Niño costero. Esto trae consecuencias devastadoras, como daños a cultivos y pérdidas humanas. Para evaluar el impacto de estas inundaciones, se llevó a cabo una investigación con el objetivo de identificar áreas propensas a inundaciones en el cauce del río Mala, aguas abajo de la estación hidrométrica La Capilla, utilizando modelos bidimensionales como IBER y HEC-RAS. Se desarrolló un código en JavaScript para obtener datos diarios de precipitación y temperatura del producto climático ERA5 Land. Estos datos se integraron en el modelo de precipitación-escorrentía GR4J, generando series históricas de caudales promedios diarios desde 1950 hasta 2024. Se realizaron simulaciones de inundaciones utilizando los modelos mencionados y se compararon con imágenes multiespectrales. Los resultados mostraron que el caudal instantáneo máximo alcanzó 235 m³/s para un periodo de retorno de 10000 años. Además, IBER mostró áreas de inundación más grandes que HEC-RAS en todos los tiempos de retorno evaluados, afectando principalmente zonas agrícolas, lo que repercute negativamente en la economía local y en la calidad de vida de la población del distrito de Mala, especialmente en la parte baja del río.

Palabras Clave: Río Mala, IBER, HEC-RAS, inundación.

I. INTRODUCCIÓN

Según [1], el cambio climático se ha intensificado en los últimos años, resultado del aumento de la temperatura global de la atmósfera y los océanos, principalmente debido a actividades humanas. La quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva y diversas industrias generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Estos gases atrapan el calor en la atmósfera, lo que provoca un efecto invernadero más pronunciado y un calentamiento global acelerado. Este fenómeno conlleva consecuencias significativas para el clima del planeta, incluyendo cambios en los patrones meteorológicos, aumento del nivel del mar, derretimiento de los glaciares, acidificación de los océanos, inundaciones y efectos adversos en la biodiversidad y los ecosistemas.

Los cambios climáticos a largo plazo, provocados por el aumento de la temperatura global, están alterando de manera

significativa los patrones de precipitación en las cuencas hidrográficas. Estas alteraciones generan inundaciones y desbordamientos de ríos.

Las inundaciones a nivel global son un fenómeno devastador que generan significativas pérdidas económicas y humanas. Según la referencia [2], las inundaciones causan daños que superan los 38 000 millones de euros anuales en todo el mundo, y en Estados Unidos, las pérdidas ascienden a aproximadamente 8 000 millones de dólares al año. El número de víctimas mortales ha aumentado en las últimas décadas, alcanzando más de 100 fallecidos anuales. Además, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) [3] señala que, entre 1998 y 2017, los desastres climáticos han ocurrido con mayor frecuencia que los geofísicos, representando el 91% del total de incidentes registrados. Dentro de esta categoría, las inundaciones destacan como el fenómeno natural más común a nivel mundial, abarcando el 43.4% de los eventos naturales ocurridos en ese periodo.

A nivel nacional, las inundaciones representan un desafío constante que se repite anualmente, especialmente durante los meses de noviembre y abril, debido a la influencia de fenómenos naturales como El Niño, La Niña y presencia eventual de ciclones. Estos eventos afectan tanto a las regiones costeras y andinas, debido a las diversas características geográficas del país, lo que aumenta significativamente el riesgo para las comunidades asentadas cerca de ríos y quebradas. Según la referencia [4], el Perú experimentó el año 2017 un fenómeno natural conocido como el Niño costero. Una de sus manifestaciones fueron las intensas y prolongadas lluvias que activaron diferentes quebradas en la zona norte y centro del país, y ocasionaron huaicos (deslizamientos de tierra o flujos de lodo) e inundaciones.

A nivel local en los últimos años, las principales cuencas del Perú, especialmente las situadas en la vertiente del Pacífico, han experimentado desbordes e inundaciones en sus ríos. Esto ha resultado en pérdidas económicas significativas y, en algunos casos, en la pérdida de vidas humanas. Este fenómeno es particularmente evidente en la cuenca del río Mala, que se ve afectada por el Fenómeno del Niño costero. Por ejemplo, en marzo de 2017, los desbordes del río Mala ocasionaron graves daños en la agricultura del valle y en la infraestructura de los distritos de Calango y Mala, afectando a 180 personas, dañando

50 viviendas y perjudicando más de 8 hectáreas de cultivos. De manera similar, las inundaciones ocurridas en 2023 generaron pérdidas económicas por más de 8 millones de soles en cultivos de maíz y uva en la misma zona [5].

En los últimos años, frente a las problemáticas relacionadas con las inundaciones, se han realizado estudios utilizando programas de modelado bidimensional, como IBER y HEC-RAS. Un estudio que compara los resultados de ambos modelos destaca que estas herramientas son poderosas y permiten una comprensión detallada, además de generar resultados confiables para la simulación de eventos de inundación. Aunque el modelado bidimensional implica una mayor complejidad, también ofrece una mayor precisión. Es importante señalar que los resultados de ambos modelos dependen en gran medida de la calidad y precisión de los datos de entrada utilizados [6].

En otro estudio, donde se realizó un modelado de inundación utilizando los softwares HEC-RAS 2D e IBER 2D, se concluyó que, en términos de la profundidad máxima de inundación, HEC-RAS presentó valores entre 0,15 y 0,17 m superiores a los obtenidos con IBER para los tres períodos de retorno analizados (50, 100 y 500 años). Por otro lado, las velocidades máximas de inundación estimadas por IBER fueron mayores que las calculadas por HEC-RAS. Las extensiones de inundación obtenidas con ambos programas coincidieron bastante bien en los tres períodos de retorno, mostrando una diferencia relativa de entre el 1 % y el 3 %. Aunque ambos modelos hidráulicos mostraron diferencias en algunas zonas específicas, se concluyó que los resultados obtenidos fueron bastante similares. Estas diferencias pueden explicarse por los distintos esquemas numéricos empleados por cada software [7].

II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación pretende determinar áreas de inundaciones en el río Mala aguas abajo de la estación hidrométrica la Capilla utilizando modelos bidimensionales IBER y HEC-RAS.

III. MARCO TEÓRICO

A. Ubicación y Datos morfológicos de la Cuenca

El río Mala pertenece a la vertiente del Pacífico en la costa peruana, ubicado en la zona UTM WGS84 Z-18S. Su cuenca se extiende entre las coordenadas de latitud sur 11°53'36" y 12°41'03", y longitud oeste 75°56'32" y 76°39'21", desembocando en el océano Pacífico. En esta región se encuentra la estación La Capilla, situada a una altitud de 442 metros sobre el nivel del mar, en la latitud 12°31'00" y longitud 78°29'00".

B. Data Cartográfica

Ante la necesidad de evaluar las inundaciones en el río Mala, se delimitó la cuenca del hidrográfica del río Mala, utilizando las cartas nacionales del Instituto Geográfico

Nacional (IGN) a escala 1:100000 tal como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1
HOJA DE LA CARTA NACIONAL DE LA CUNCA MALA

N° DE CARTA	NOMBRE
24-K	MATUCANA
25-J	LURIN
25-K	HUAROCHIRI
25-L	YAUYOS
26-J	MALA
26-K	LUNAHUANA

C. ERA5 Land

Es un modelo que se enfoca en el estudio del territorio en relación con el cambio climático, incluyendo la elaboración de inventarios y la consideración de variables ambientales para la modelización de ecosistemas. Los datos ambientales de ERA5 ofrecen información a nivel global sobre elementos como cuerpos de agua, precipitaciones, temperaturas, radiación y evapotranspiración, entre otros Gis & Beers,2020 [8].

D. Modelo GR4J

GR4J es un modelo hidrológico diseñado para simular el comportamiento de cuencas hidrográficas. Lo cual se emplea para estimar la escorrentía superficial y simular el flujo de agua en una cuenca. Se fundamenta en conceptos hidrológicos y meteorológicos para representar los procesos esenciales, como la precipitación, la evapotranspiración, la retención de agua en el suelo y la escorrentía. A pesar de ser un modelo conceptual, ha sido utilizado en diversas regiones del mundo y ha demostrado ser valioso en la gestión del agua y en la predicción de caudales [9].

E. Tiempo de retorno

El tiempo o periodo de retorno se utiliza comúnmente para estimar la probabilidad de que un evento específico ocurra dentro de un periodo determinado. En ingeniería hidráulica, se emplea para determinar la probabilidad de que una crecida de caudal extremo ocurra en cualquier año [10].

F. Coeficiente de Manning

En el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, el coeficiente de rugosidad de Manning es un indicador clave que refleja la resistencia al flujo en un canal. Su determinación requiere la experiencia del especialista, quien puede apoyarse en antecedentes, casos similares, tablas y publicaciones técnicas disponibles. Además, es fundamental considerar los datos recopilados durante la etapa de campo para realizar estimaciones precisas. [11]

G. Land Viewer

Land Viewer es, sin duda, uno de los visores de procesamiento de imágenes multiespectrales más completos y fáciles de usar. Se trata de una herramienta en línea muy interesante que permite integrar imágenes de diversos satélites, analizar sus bandas para crear imágenes multiespectrales en

colores reales y en falso color, y realizar descargas de manera instantánea [12].

H. Modelo digital de elevación

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) son una representación numérica de la superficie terrestre que captura datos sobre la elevación del terreno en un área específica. Esta representación se organiza en una cuadrícula o malla, donde cada celda o píxel tiene un valor que indica su altura sobre un nivel de referencia, generalmente el nivel del mar [13].

I. Iber

Es IBER es un modelo matemático bidimensional diseñado para simular flujos en ríos, canales y cauces naturales, facilitando el cálculo de inundaciones, así como la delimitación de zonas propensas a inundarse. Su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Saint Venant en 2D. Este enfoque se basa en las suposiciones de presión hidrostática y velocidad uniforme en la profundidad del agua [14].

J. HEC-RAS

Es un software integrado diseñado para el análisis hidráulico interactivo, permitiendo la simulación de flujos unidimensionales en diferentes entornos. Este sistema cuenta con una interfaz gráfica que facilita la administración de datos y la visualización de resultados. Fundamentalmente, HEC-RAS abarca tres componentes clave: el cálculo del perfil de la superficie del agua en flujo permanente, la simulación de flujo no permanente y el transporte de sedimentos. Los usuarios pueden emplear datos geométricos comunes y rutinas hidráulicas en estos componentes. Además, el software incluye diseños hidráulicos específicos que se pueden aplicar tras calcular el perfil de la superficie del agua, aunque actualmente solo soporta el cálculo para flujo permanente, con la promesa de nuevas características en futuras versiones [15].

K. Google Earth Engine (GEE)

Es una Plataforma gratuita de análisis geoespacial que permite a los usuarios observar imágenes satelitales de la Tierra. Esta plataforma es utilizada por científicos e investigadores para anticipar brotes de enfermedades, gestionar recursos naturales, entre otros usos [16].

L. ArcGIS

Es un sistema integral para gestionar información geográfica, permitiendo su recopilación, organización, análisis y distribución. Utilizado globalmente en sectores como el gobierno, la empresa y la educación, ArcGIS facilita la publicación de datos geográficos accesibles a través de navegadores web y dispositivos móviles [17].

IV. METODOLOGÍA

A. Delimitación de la cuenca

Ante la necesidad de evaluar las inundaciones en el río Mala, se delimitó la cuenca del hidrográfica del río Mala,

utilizando la carta nacional a escala 1:100000 en el software ArcGIS. En este proceso se localizó la estación hidrométrica La Capilla, ríos, lagos, como se muestra en la figura 1.

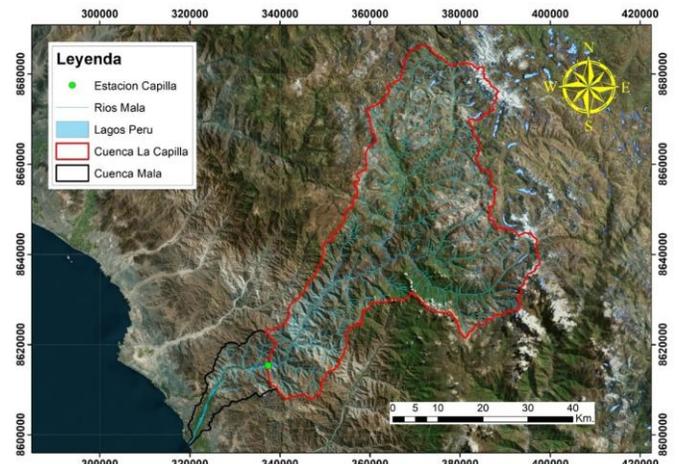


Fig. 1 Delimitación del área de la cuenca hidrográfica de Mala

B. Descarga de precipitación y temperatura

Ante la falta de registros de precipitación, temperatura y de caudales dentro de la cuenca del río Mala hasta la estación hidrométrica La Capilla, se desarrolló un código en JavaScript. Este código nos permitió obtener datos históricos de registros de precipitación y temperatura a partir del producto grillado climático ERA5 Land, utilizando GEE. En esta plataforma se cargaron los archivos que representan la cuenca en formatos .dbf, .prj, .shp y .shx. Finalmente, se ejecutó el código programado y se descargó los registros de precipitación diaria promedio y temperatura diaria promedio, dentro de la cuenca del río Mala, hasta la estación hidrométrica La Capilla, como se muestra en las Figura 2.

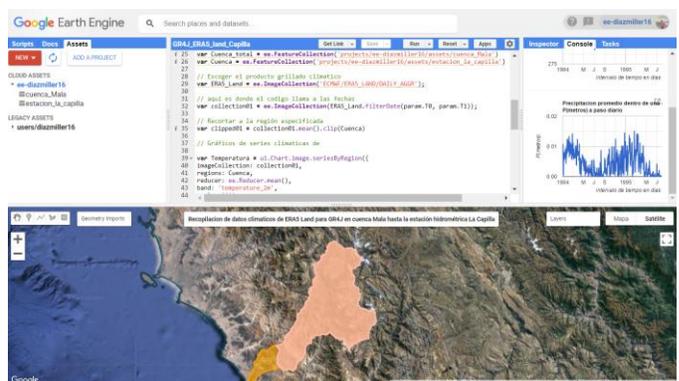


Fig. 2 Visualización de GEE utilizando el código.

C. Determinación de caudales

Después de descargar los datos de precipitación y temperatura del producto grillado ERA5 Land, se procedió a obtener los registros de caudales promedios diarios de la estación hidrométrica La Capilla. Estos datos fueron extraídos del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos

(SNIRH). Sin embargo, es importante señalar que la estación solo dispone de registros desde el 01 de agosto de 2018 hasta el 09 de julio de 2020.

Para llevar a cabo un estudio adecuado de caudales en función de diferentes períodos de retorno, es necesario extraer los valores máximos de caudales anuales. Sin embargo, en la estación hidrométrica La Capilla, los datos disponibles resultan insuficientes para el análisis. Por esta razón, en esta investigación se generaron caudales diarios utilizando registros de precipitaciones y temperaturas provenientes del producto grillado ERA5 Land. Para esto, se aplicó el método francés de precipitación-escorrentía GR4J.

Ya teniendo los datos de caudales a paso diario de la estación hidrométrica La Capilla realizamos la calibración para un periodo comprendido entre 11 de agosto 2019 hasta el 30 de junio de 2019 y la validación para el periodo comprendido entre el 21 de julio de 2019 hasta el 09 de julio de 2020.

Después de calibrar el modelo y obtener los parámetros correspondientes (X1, X2, X3, X4), así como de alcanzar los criterios de eficiencia de Nash mayor a 75%, se evidencia un ajuste adecuado al modelo. Una vez obtenido los parámetros del modelo para la calibración como se muestra en la Figura 3. Asimismo, se realizó un análisis para el periodo de validación como se muestra en la Figura 4.

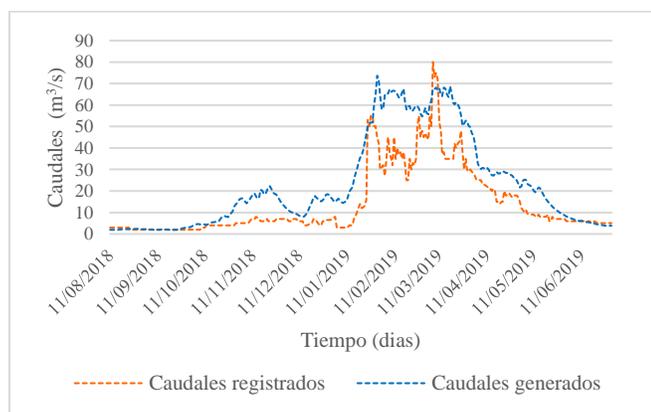


Fig. 3 Caudales medidos y generados para el periodo de calibración

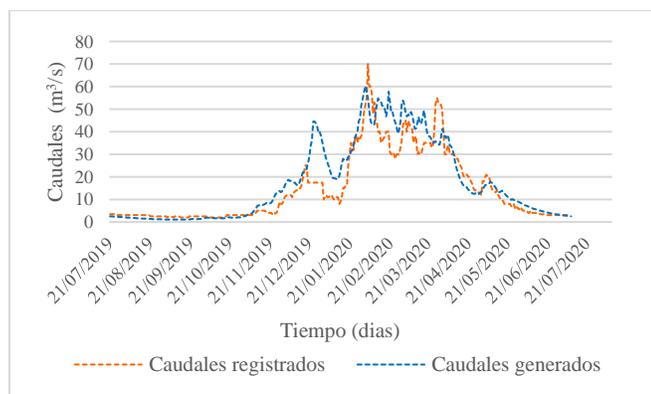


Fig. 4 Caudales medidos y generados para el periodo de validación

Al tener valores muy similares para de los parámetros del modelo de calibración y validación se optó por usar los parámetros del modelo de la calibración y junto a los registros de precipitación y temperatura obtenidos desde ERA5 Land, se emplearon estos parámetros para generar la serie historia de caudales diarios para el periodo 1950 al 2024. La serie histórica se puede apreciar en la Figura 5.

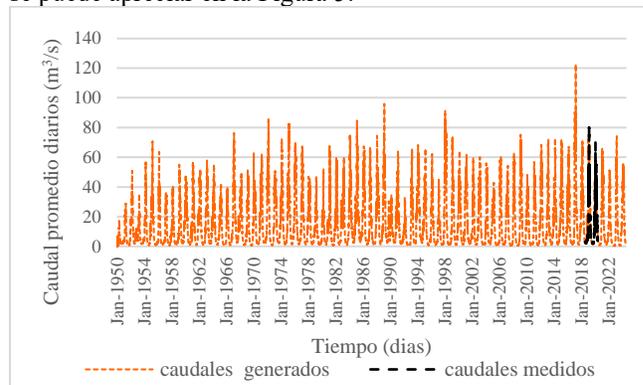


Fig. 5 Caudales diarios medidos y generados entre los años 1950 a 2024

Con 74 años de datos de caudales registrados, se realizó un cálculo de probabilidad experimental para estimar los caudales correspondientes a diferentes períodos de retorno. Para ello, se empleó modelos de análisis estadístico, incluyendo los modelos de análisis de frecuencia de California, Hazen, Weibull, Chegodayev, Blom, Turkey y Grigorten.

A partir de los registros de caudales máximos anuales obtenidos mediante diferentes métodos, se seleccionó el método de Weibull debido a que presenta valores más elevados en comparación con los otros métodos. Se calculó el promedio de los caudales máximos diarios. Sin embargo, para llevar a cabo un análisis adecuado de las diversas áreas de inundación, es esencial convertir estos valores en caudales máximos instantáneos. Para realizar esta conversión, se utiliza la fórmula de Fuller, que permite estimar con mayor precisión el comportamiento de los caudales en condiciones extremas, estos resultados de muestran en la tabla 2.

TABLA 2
CAUDALES INSTANTÁNEOS A DIFERENTE TR

AÑOS	CALIFORNIA	HAZEN	WEIBULL	CHEGADAYEV	BLOM	TURKEY	GRIGORTEN
2	68.1	68	68.3	68	68	68	68
5	86	84.7	86.2	85.3	85.1	85.2	84.9
10	99.5	97.3	99.8	98.3	97.9	98.1	97.6
25	117.5	114	117.7	115.5	115	115.3	114.5
50	131	126.6	131.3	128.5	127.8	128.2	127.2
75	139	133.9	139.2	136.2	135.4	135.8	134.6
100	144.6	139.2	144.8	141.6	140.7	141.2	139.9
500	176.1	168.4	176.3	171.8	170.6	171.3	169.5
1000	189.6	181	189.9	184.9	183.5	184.3	182.3
10000	234.7	222.9	234.9	228.2	226.3	227.3	224.6

D. Hidrograma

Es la representación del aumento de caudales frente a una lluvia extrema, la cual es básico para las simulaciones en los softwares bidimensionales. Al no tener la distribución de caudales se realizó una estimación para el hidrograma para los diferentes tiempos de retorno.

E. Elaboración del DEM

La elaboración del Modelo Digital de Elevación (DEM) del área de estudio comenzó con la delimitación de la cuenca del río Mala, utilizando el software ArcGIS. En esta etapa se generó un archivo en formato .kmz. Debido a que, se requiere un DEM de máxima resolución se descargaron imágenes satelitales de la plataforma Land Viewer, la cual proporciona datos de elevación de terreno con pixeles de resolución de 5 m x 5 m. Para ello, se utilizaron el archivo .kmz y se trabajó dentro de la proyección UTM Zona 18S, en la cual se encuentra ubicado la cuenca del río Mala.

Se descargaron un total de 30 rásteres de 1 Km x 1 Km que abarcan toda la zona de estudio. Posteriormente se unió en un solo ráster y se recortó solamente el área de estudio de la cuenca del río Mala aguas abajo a la estación La Capilla. Para asegurar la calidad del DEM, se realizó el emparejamiento de ciertos puntos utilizando diversas herramientas de ArcGIS. Tras completar los pasos anteriores, se obtuvo el DEM correspondiente a la zona de estudio. Finalmente, se guardó la información en formatos compatibles con los softwares IBER y HEC-RAS, facilitando su uso en las modelaciones hidráulicas.

F. Coeficiente de Manning

A partir del DEM generado, y de la información visual recopilada de la visita a campo se realizó una clasificación de diversos elementos presentes en el área de estudio, tales como arena, población, río, roca y vegetación. Teniendo esta clasificación se asignó un coeficiente de rugosidad de Manning específico para cada tipo de terreno, como se muestra en la Tabla 3.

TABLA 3
CLASIFICACIÓN DE MANNING

Usos de suelo		n
1	Arena	0.023
2	Población	0.030
3	Río	0.025
4	Roca	0.023
5	Vegetación	0.026

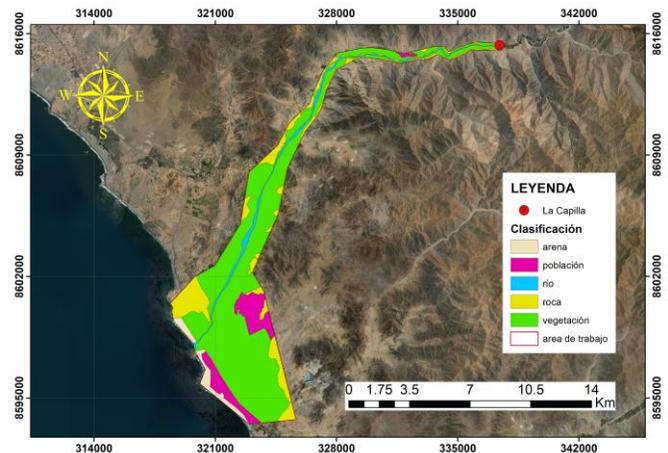


Fig. 6 Clasificación de Manning en ArcMap

G. Modelado en IBER

Esta herramienta es desarrollada por la Administración Pública Española, surge debido a necesidad de centros de estudios hidrográfico. Su propósito es permitir la simulación bidimensional de flujos de ríos y canales, considerando diferentes tiempos de retorno. A continuación, presentaremos el flujograma correspondiente, consulte la figura 7. Esta secuencia se seguirá para modelar el río Mala, desde la estación hidrométrica La Capilla hasta su desembocadura en el mar.

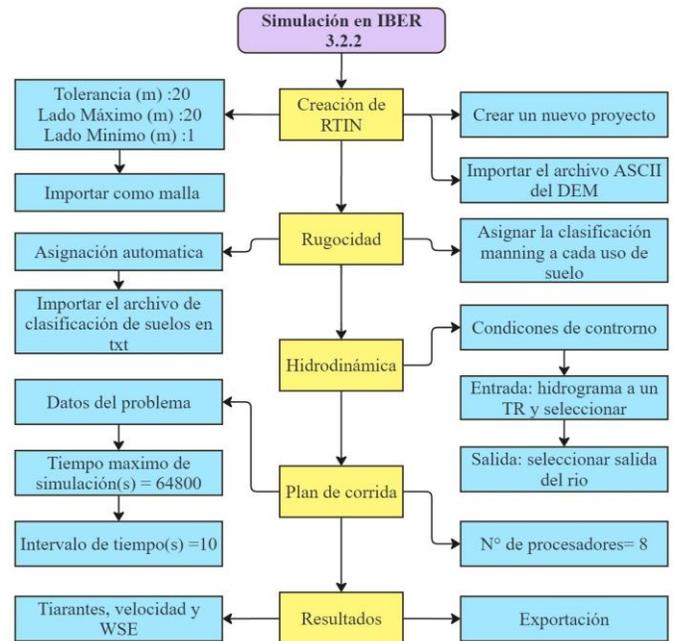


Fig. 7 Flujograma de trabajo en IBER

El modelado en IBER, versión 3.2.2, inicia importando el DEM en formato ASCII, previamente preparada en ArcMap, en la cual se le asigna el mallado correspondiente a tolerante y máximo de 20. Cuando haya terminado el proceso de importar

la topografía se empieza a colocar los datos de rugosidad, hidrodinámica y los datos del problema.

Para los datos de rugosidad se asigna el uso de suelo dependiendo de la clasificación que se dio, para luego importar los datos de rugosidad en formato ASCII proveniente del ArcMap. Es importante que el nombre de los archivos ASCII tengan el mismo nombre que el Excel que se generara de la rugosidad.

Para el hidrograma, ya está previamente creada a diferentes tiempos de retorno, nos ubicamos en el ítem de Hidrodinámica de Iber y pegamos el hidrograma asignando un tiempo de retorno. Posteriormente, asignamos la entra y la salida del flujo en el área de trabajo.

Finalmente, en datos del problema colocamos el tiempo en segundos completo que demorara en correr la simulación. También, se colocará el intervalo de tiempo que se requiere para su análisis, la cual es de 10 segundos para todos los tiempos de retorno. Es importante colocar el número de procesadores con el que se desea simular, en este caso se tiene 12 procesadores de la cual utilizaremos 8 para la simulación. Como último paso se pone a calcular y esperamos a que termine el proceso de simulación la cual demoro aproximadamente 12 horas reales.

Una vez terminada el proceso de simulación, se puede observar el flujo y que áreas abarca dicho flujo. Para llevar a cabo un análisis más detallado de los resultados, se descargan los datos de velocidad, tirantes y cota de agua, los cuales se exportan a ArcMap. Este procedimiento se repite para cada tiempo de retorno. Al tener todos los resultados correspondientes a distintos tiempos de retorno, se procede a compararlos, identificando las áreas afectadas por la inundación y generando los mapas pertinentes.

H. Modelado en HEC – RAS

HEC-RAS es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos que se utiliza para el modelado bidimensional de flujos en ríos y canales. En el presente estudio, se empleó HEC-RAS para modelar las inundaciones del río Mala, siguiendo el flujograma que se presenta en la Figura 8.

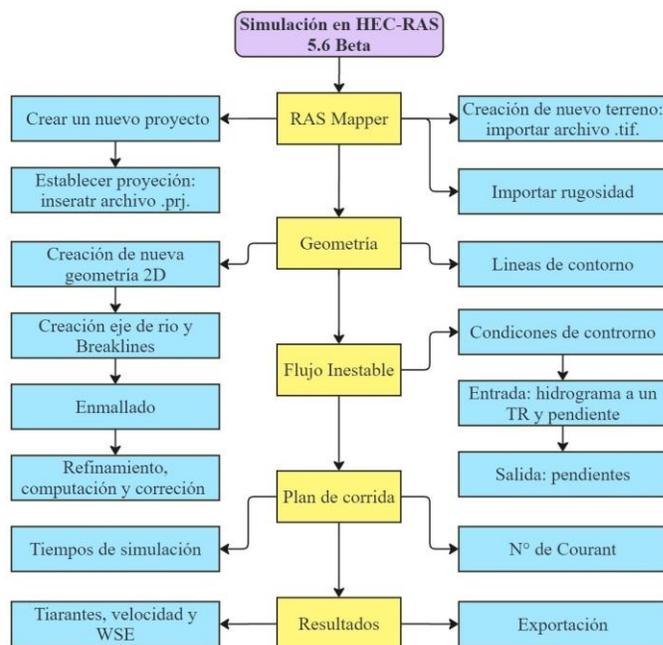


Fig. 8 Flujograma de trabajo en HEC-RAS

En primer lugar, en el entorno de HEC-RAS 5.6 beta se creó un nuevo proyecto. A continuación, entramos a RAS Mapper y seguimos la siguiente ruta: proyecto/set proyección/seleccionamos el archivo .prj. con la finalidad de proyectar las coordenadas del área de estudio en el entorno de RAS MAPPER. Posterior a ello, para crear el nuevo terreno seguimos: proyect/ create new ras terrain/ ubicamos el archivo .tif. con lo cual se cargará el DEM de trabajo.

En segundo lugar, se creó una nueva la geometría en la siguiente ruta: Geometry/2D Flow área/ perimetres con este último se crea el contorno del área de estudio. Para ello se consideró una simulación inicial que proporcionó información sobre el posible alcance de la inundación ante un máximo TR. Este enfoque permitió delimitar con precisión el contorno, ya que un área más extensa implicaría un mayor tiempo de simulación.

Teniendo el contorno, para crear el enmallado seguimos la ruta: 2D Flow área/ perímetro/ edit. 2D área properties, y se crea el enmallado total de 5m x 5m. Seguidamente, asignamos los coeficientes de Manning y generamos la computación de puntos. Posteriormente, creamos el eje de río. Seguidamente, ajustamos la malla cercana a los ejes del río siguiendo la ruta: 2D Flow área/ breaklines/ edit breaklines properties colocamos en enmallado de 3m. Redefinimos el conflicto y con ello se tiene el enmallado dentro del contorno de la cuenca Mala

En tercer lugar, se crea las líneas de contorno, aguas arriba y aguas abajo del río. En el entorno principal de HEC-RAS, se creó un nuevo análisis de flujo inestable mediante la ruta: edit/ unsteady Flow data. Para la condición aguas arriba, establecemos el hidrograma a diferentes TR y la pendiente. En la condición aguas abajo, se coloca Normal Depth y se inserta la pendiente.

En cuarto lugar, en el entorno principal de HEC-RAS, se creó un nuevo plan de corrida, estableciendo el tiempo de simulación de 18 horas, de acuerdo con el hidrograma. A continuación, se realizó la configuración de cálculo: el intervalo de computación se fijó en 0.2 segundos, mientras que el intervalo de salida de mapeo se estableció en 10 segundos. Además, se definieron los intervalos de salida del hidrograma y del análisis detallado en 1 minuto cada uno. Finalmente, se ajustó el número de Courant a 1

Finalmente, al terminar la simulación en RAS Mapper se visualizan los resultados a través de mapas que muestran cómo varían los niveles de agua, velocidades y WSE a diferente TR.

V. RESULTADOS

Tras realizar el modelamiento del río en el software HEC-RAS, se pudo obtener los mapas de inundación que reflejan resultados de velocidad, tirantes, cota de agua, para todos los tiempos de retorno: TR2, TR5, TR10, TR25, TR50, TR75, TR100, TR500, TR1000, TR10000. En esta sección se presentan únicamente los resultados correspondientes a TR10000 años. Por motivos de espacio, se han seleccionado para su visualización únicamente los valores más extremos obtenidos en las modelaciones, tal como se muestran en las Figuras 9, 10 y 11.

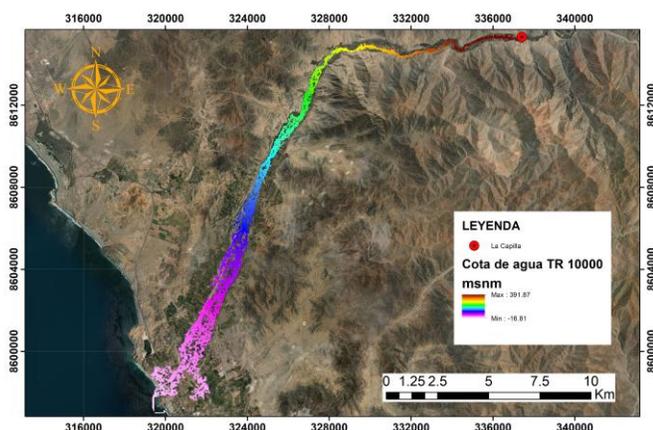


Fig. 9 Mapa de cota de agua en HEC-RAS

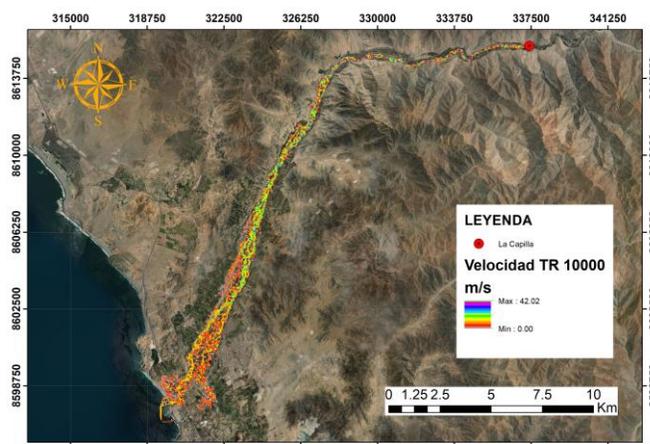


Fig. 10 Mapa de Velocidad en HEC-RAS.



Fig. 11 Mapa de tirante en HEC-RAS

Los resultados del estudio muestran las áreas inundadas en la cuenca del río Mala, revelando que las zonas más afectadas son las áreas agrícolas situadas cerca del cauce del río. Al comparar los impactos de las inundaciones para los periodos de retorno de 2 años (TR2) y 10,000 años (TR10000), se observa que en la parte alta de la cuenca ambas condiciones presentan un alcance de inundación similar. Sin embargo, la diferencia significativa radica en la velocidad del flujo: para TR10000, la velocidad alcanza los 42 m/s, mientras que para TR2 es de 10 m/s. Esta variación en la velocidad sugiere un mayor potencial de daño en eventos extremos. Además, existe una tendencia clara de que a medida que se incrementa el periodo de retorno, también se expande el área de inundación en la parte baja de la cuenca.

Tras realizar el modelamiento del río Mala en IBER, se obtuvo mapas de inundación para todos los TR, en esta sección se muestra la cota de agua para un TR10000, como se muestra en las figuras 12, 13, 14.

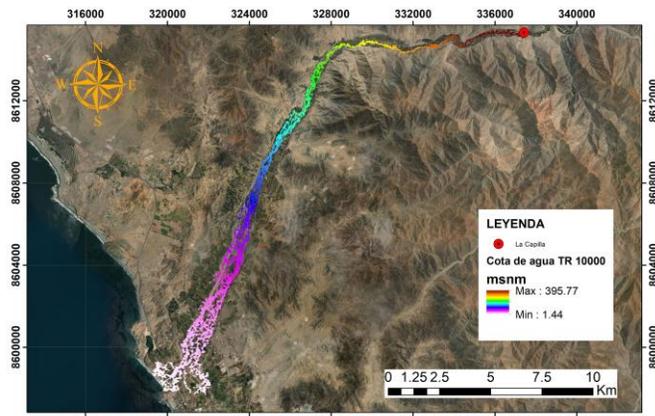


Fig. 12 Mapa de cota de agua en IBER

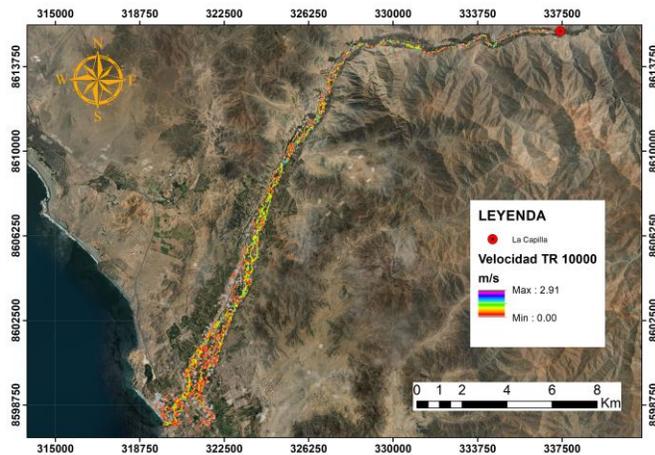


Fig. 13 Mapa de velocidad en IBER



Fig. 14 Mapa de Tirante en IBER

Comparando las simulaciones realizadas, se ha observado que el modelo IBER presenta una mayor área de inundación en comparación con HEC-RAS para todos los tiempos de retorno analizados, como se ilustra en la Figura 15. Esta diferencia en los resultados puede atribuirse a la metodología de enmallado utilizada en cada modelo. IBER utiliza un mallado de polígonos

triangulares, lo que permite una mayor flexibilidad y adaptación a la topografía del terreno. En contraste, HEC-RAS emplea un enmallado cuadrangular, que puede limitar la precisión del modelado en áreas con geometría más compleja. Además, es importante destacar que los resultados obtenidos pueden estar influenciados por factores como el tiempo de computación y la sensibilidad del enmallado seleccionado.

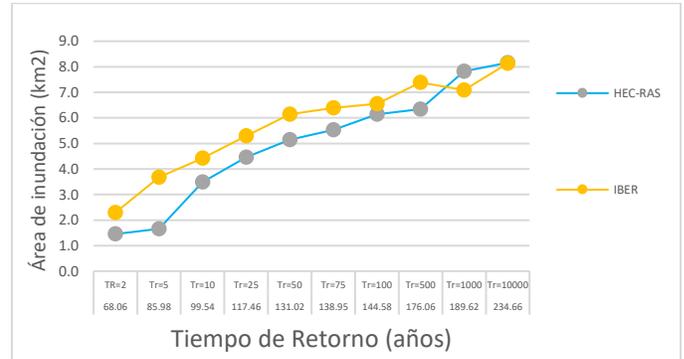


Fig. 15 Áreas de inundación vs caudal a diferente TR en IBER y Hec

VI. LIMITACIONES

En esta investigación se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 4.5 m x 4.5 m, obtenido a partir de imágenes satelitales mediante la plataforma gratuita Land Viewer. Para casos que requieran simulaciones con un DEM de alta resolución, inferior a 1 m x 1 m, es necesario realizar un levantamiento topográfico, a fin de obtener un modelo digital de terreno (MDT). Sin embargo, debido a la extensión del área de estudio, que abarca 24 km lineales, obtener un MDT con esa resolución resultaría muy costoso y poco factible para este trabajo.

VII. CONCLUSIONES

La aplicación del modelo precipitación-escorrentía GR4J y junto con su calibración y validación con datos de la estación hidrométrica La Capilla permitió obtener caudales promedio diarios. Asimismo, el uso de la fórmula de Weibull para el cálculo de la probabilidad empírica facilitó la generación de caudales instantáneos para diferente tiempo de retorno y diferentes métodos. Sin embargo, se usó solamente el método de Weibull, estos caudales sirvieron como entrada en la modelación hidráulica en IBER y HEC-RAS.

La comparación entre los modelos HEC-RAS e IBER revela que el modelo IBER tiende a mostrar una mayor área de inundación en todos los tiempos de retorno analizados. Esta diferencia es atribuible a la metodología de enmallado utilizada: el uso de polígonos triangulares en IBER permite una adaptación más precisa a la topografía del terreno, mientras que el enmallado cuadrangular de HEC-RAS puede limitar la exactitud del modelado en áreas con geometría compleja.

REFERENCIAS

La evaluación de las inundaciones en la cuenca del río Mala, mediante la simulación de inundaciones en IBER Y HEC-RAS indican que las zonas agrícolas, ubicadas cerca del cauce del río, son las más vulnerables a las inundaciones. También se visualiza que ante una inundación TR10000, parte del distrito de mala se ve afectada. Esto subraya la necesidad de implementar estrategias de gestión del riesgo de inundaciones que protejan tanto los medios de vida agrícolas como la seguridad de los residentes.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Investigación de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por el apoyo brindado para realización de este trabajo de investigación a través del incentivo UPC-EXPOST-2025-1.

- [1] Fernandez, G., Gomes, M., Garijo, C., Anta, D., Cámara, A., Whyte, M. (2018). Inundación y Cambio Climático. Editores y experiencias a nivel europeo en el primer ciclo de la directiva. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/libro-cambio-climatico-inundaciones-web-06092019_tcm30-499367.pdf [Consultado el 30 de agosto de 2024].
- [2] Nuñez, C. (2022). *¿Qué son las inundaciones?* National Geographic Recuperado de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/inundaciones> [consulta: 07 de abril del 2024]
- [3] UNDRR. (2019). Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017. <https://eird.org/america/docs/perdidas-economicas-pobreza-y-desastres.pdf>
- [4] Rojas, W. (2019). Percepción de riesgo ante las inundaciones en personas que habitan en zonas vulnerables de Lima, Perú. Revista cubana de salud pública. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rcsp/v45n2/1561-3127-rcsp-45-02-e1190.pdf> [consulta: 07 de abril del 2024]
- [5] Comercio (2023). <https://elcomercio.pe/lima/canete-desborde-de-rio-mala-deja-s-8-millones-en-perdidas-inundaciones-lluvias-huaicos-indeci-senamhi-noticia/>
- [6] Martins, M., Gonçalves, P., Gomes, A., Teixeira, J. (2020). Definition of Flood-Prone Areas: A Comparison between HEC-RAS and Iber Software Results. En: Fernandes, F., Malheiro, A., Chaminé, H. (eds.) Advances in Natural Hazards and Hydrological Risks: Meeting the Challenge. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34397-2_25
- [7] Djafri, S., Cherhabil, S., Hafnaoui, M., Madi, M. (2024). Flood modeling using HEC-RAS 2D and IBER 2D: a comparative study. *Water Supply*, 24(9), 1-16. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.184>
- [8] Gis & Beers. (2020, 8 de febrero). ERA5-Land, datos climáticos por hora desde 1981. Recuperado el 10 septiembre de 2024, de <https://www.gisandbeers.com/era5-land-datos-climaticos-hora-desde-1981/#:~:text=ERA5%20te%20ofrece%20variables%20ambientales,radiaci%C3%B3n%20de%20evapotranspiraci%C3%B3n%20entre%20otras.>
- [9] Senamhi (2012) Modelamiento Hidrológico de la cuenca del río vilcanota usando los modelos GR4 y TANKE. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/2145/Modelamiento-hidrol%C3%B3gico-de-la-cuenca-del-r%C3%ADo-Vilcanota-usando-los-modelos-GR4J-y-TANKE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] Chereque, W. *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [11] Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje. Ministerio de Transporte y Comunicaciones Perú. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- [12] Gis & Beers. (2017, 18 de marzo). *Land Viewer: procesamiento de imágenes multiespectrales*. Recuperado el 10 septiembre de 2024, de <https://www.gisandbeers.com/land-viewer-procesamiento-de-imagenes-multiespectrales-online/Angel M. Felicísimo. Modelos Digitales del Terreno. https://www6.uniovi.es/usr/feli/pdf/libromdt.pdf>
- [13] Roa, J., & Kamp, U. (2008). Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. *Revista Geográfica Venezolana*, 49(1), 11-42. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730375002.pdf>
- [14] Iber. Estudio de Cauces e Inundaciones Modelización Hidráulica Bidimensional. <https://www.ididactia.com/course/iber-estudio-de-cauces-e-inundaciones-modelizacion-hidraulica-bidimensional/#:~:text=IBER%20es%20un%20software%20libre.esquem%C3%A1tico%20en%20vol%C3%B3menes%20finitos.>
- [15] Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. HEC-RAS. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- [16] Solórzano, J. & Perilla, G. (2022). Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento. <https://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/view/view.php?doc=9789585183551-Como-usar-Google-Earth-Engine-y-no-fallar-en-el-intento.pdf>
- [17] Esri. ¿Qué es ArcGis? <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>