

DESEMPEÑO DE MODELOS DE INUNDACIÓN 2023: EVALUACIÓN DE 29 SITIOS CRÍTICOS EN VALLE DE SULA

Carlos Abrego^{1,*}; Miguel Rivera^{2,†}; Brenda Antúñez^{3,‡}; Javier Meza^{4,§}; Yeny Castellanos^{5,¶}

¹Ingeniero Civil, Máster en Hidrogeología con enfoque en Recursos Hídricos.
Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH).

²Ingeniero Civil. Especialista en Gestión de Riesgo. GOAL Internacional.

³Arquitecta, Máster en Ordenamiento y Gestión del Territorio. GOAL Internacional.

⁴Ingeniero Forestal, Máster en Ordenamiento y Gestión del Territorio. UNAH.

⁵Ingeniera en Sistemas, Máster en Ordenamiento y Gestión del Territorio. UNAH.

Recibido: 04-04-2025

Aceptado: 20-05-2025

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v16i1.20506>

RESUMEN

En noviembre de 2020, la devastación causada por las tormentas tropicales Eta e Iota dejaron miles de familias afectadas, con pérdidas significativas en infraestructura y un alto riesgo de desastres futuros para los municipios del Valle de Sula. Aumentar el conocimiento del riesgo sobre las amenazas a inundaciones en esta zona toma especial relevancia para la resiliencia urbana al ser el motor económico de Honduras, generando el 30% del producto interno bruto del país. El objetivo principal de esta investigación fue validar y confirmar la precisión, integridad y fiabilidad de las planicies inundables obtenidas mediante modelización hidrológica e hidráulica en las cuencas de los ríos Chamelecón y Ulúa, distribuidas en el Valle de Sula. Para ello, se evalúa el desempeño de los modelos utilizando el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, contrastando los resultados con observaciones participativas realizadas en campo. Estas observaciones se basan en variables definidas previamente, como profundidad, permanencia y velocidad del agua. La investigación incorpora el diseño de herramientas modernas para la evaluación y recolección de datos (como *KoboToolbox*), así como procesos participativos con actores clave y plataformas especializadas en modelización hidrológica. Mediante esta metodología, se analizaron 29 sitios críticos en el Valle de Sula. Finalmente, la revisión de los datos recopilados sobre los niveles de agua en las zonas más afectadas permitió calibrar el modelo hidráulico-fluvial. Tras ajustar los parámetros de rugosidad, se validó su desempeño mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el cual indicó un buen nivel de precisión.

Palabras clave: Planicies inundables, reducción de riesgos de desastres, modelización hidráulica, Nash-Sutcliffe.

ABSTRACT

In November 2020, the devastation caused by Tropical Storms Eta and Iota left thousands of families affected, with significant infrastructure losses and a high risk of future disasters for the municipalities

*carlos.abrego@unah.edu.hn.

†mriviera@hn.goal.ie.

‡bantunez@hn.goal.ie.

§javier.meza@unah.edu.hn.

¶ycastellanos@unah.edu.hn.

of the Sula Valley. Increasing risk awareness regarding flood threats in this area is particularly important for urban resilience, as it is the economic engine of Honduras, generating 30% of the country's gross domestic product. The main objective of this research was to validate and confirm the accuracy, completeness, and reliability of floodplains obtained through hydrological and hydraulic modeling in the Chamelecón and Ulúa river basins, which are distributed throughout the Sula Valley. To achieve this, the performance of the models was evaluated using the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, comparing the results with participatory field observations. These observations were based on previously defined variables such as water depth, duration, and flow velocity. The research incorporated the design of modern tools for data collection and evaluation (such as KoboToolbox), as well as participatory processes with key stakeholders and specialized platforms for hydrological modeling. Through this methodology, 29 critical sites in the Sula Valley were analyzed. Finally, the review of the data collected on water levels in the most affected areas allowed for the calibration of the hydraulic-river model. After adjusting the roughness parameters, its performance was validated using the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient, which indicated a good level of accuracy.

Keywords: Floodplains, Disaster Risk Reduction, Hydraulic modeling, Nash-Sutcliffe.

1 *Introducción*

Ubicado en la región norte de Honduras, el Valle de Sula conformado por 20 municipios, ubicados en dos cuencas importantes: el río Ulúa y el río Chamelecón, los cuales representan el 24 % del territorio nacional. Esta región se caracteriza por ser altamente productiva y por su desarrollo urbano creciente, aunque también presenta un alto grado de vulnerabilidad ante desastres. Es una zona propensa a inundaciones fluviales debido a su geografía, la magnitud de las superficies de aportación a este y las características propias de su sistema de drenaje.

En 2020, los huracanes Eta e Iota afectaron a más de 4 millones de personas sólo en Honduras, provocando 95 muertes y desplazando a más de 96,000 personas a alojamientos temporales. La región norte, especialmente el Valle de Sula (Cortés, Yoro, Atlántida y Santa Bárbara), fue la más golpeada con lluvias de hasta 750 mm en pocos días. La economía sufrió pérdidas superiores a 52 mil millones de lempiras, con un fuerte impacto sobre el empleo y los medios productivos, especialmente en comercio e industria (más de 15,741 millones de lempiras) y agricultura (más de 8,835 millones). Estos daños generaron un aumento inmediato del desempleo agravado por la pandemia de COVID-19, debido a la pérdida del sustento de pequeños productores y el traslado forzado de trabajadores desde el empleo formal hacia el sector informal, provocando una caída en los ingresos familiares y aumentando los niveles de pobreza en el país (CEPAL, 2021).

En el mismo 2020, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) encargó, a la empresa iPresas, la labor de realizar una revisión y propuesta de obras de protección frente a las inundaciones fluviales en el Valle de Sula (iPresas, 2021). De este proceso se desarrolló la primera modelización hidrológica e hidráulico-fluvial para la zona, enfocada en la inversión para la reparación, rehabilitación y construcción de obras de drenaje y canales para el control de inundaciones. Debido a los costos, la modelización se realizó en oficina sin procesos de consulta ni validación en campo.

Bajo este contexto, GOAL Internacional en el marco del proyecto Barrio Resiliente Zona Metropolitana Valle de Sula (BR-ZMVS) financiado por la Oficina de Asuntos Humanitarios (BHA) de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), pretende aumentar la resiliencia urbana con enfoque en Reducción de Riesgos a Desastres (RRD) en los municipios que la conforman. Para fortalecer el componente del conocimiento del riesgo del Sistema de Alerta y Acción Temprana regional, en el

2023 se realizó el proyecto de actualización y validación de Planicies de Inundación del Valle de Sula, que tomo como principal insumo el estudio de iPresas y coordino con investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) su desarrollo. Este artículo describe principalmente el proceso de validación y estimación del desempeño mediante la integración de datos de campo, con el propósito de garantizar una mejor preparación y respuesta ante eventos similares, utilizando datos obtenidos directamente de los afectados en los diversos poblados a lo largo del valle.

El propósito principal fue validar y confirmar la precisión, integridad y fiabilidad de las planicies inundables obtenidas mediante modelización hidrológica e hidráulica del Valle de Sula, recurriendo al coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe como un estimador del desempeño de este modelo, con respecto a las observaciones realizadas en campo. Específicamente, se pretendió (1) Definir variables y herramientas para el levantamiento de información en puntos críticos priorizados en el Valle de Sula. (2) Evaluar la concordancia entre la información georreferenciada durante las giras de campo y los resultados obtenidos de las modelizaciones hidrológica e hidráulica.

2 Generalidades

2.1 Conceptos claves

Según [Suárez \(2013\)](#), las inundaciones son lluvias intensas o continuas sobrepasan la capacidad de retención e infiltración del suelo, la capacidad máxima de transporte del río o arroyo es superada y el cauce principal se desborda e inunda los terrenos cercanos a los propios cursos de agua. Este mismo autor menciona que, las inundaciones pueden clasificarse en dos tipos según el tipo de territorio donde se estén desarrollando. (1) Inundaciones Pluviales: Es suelos con bajo avenamiento o terrenos impermeables por intervención humana sin las adecuadas obras de drenaje, son el tipo de inundaciones que se producen por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica sin que ese fenómeno coincida necesariamente con el desbordamiento de un cauce perenne cercano. Este tipo de inundación se genera tras un régimen de precipitaciones intensas o persistentes, es decir, por la concentración de un elevado volumen de lluvia en un intervalo de tiempo muy breve o por la incidencia de una precipitación moderada y persistente durante un amplio período de tiempo sobre un suelo poco permeable. (2) Inundaciones fluviales (por desbordamientos de los ríos): La causa de los desbordamientos de los ríos y los arroyos es atribuida al aumento brusco del volumen de agua más allá de lo que un lecho o cauce es capaz de transportar sin desbordarse, durante lo que se denomina como crecida (consecuencia del exceso de lluvias).

Las inundaciones repentinas se encuentran entre los peligros naturales más devastadores; ocurren en cuencas hidrográficas con tiempos de respuesta muy cortos. La identificación de zonas potencialmente afectadas por estos eventos y la elaboración de mapas precisos de susceptibilidad a inundaciones repentinas son fundamentales para una gestión adecuada de este riesgo en una región.

Por otro lado, [Hernández V. \(2018\)](#) menciona que las planicies inundables desde el punto de vista de la geomorfología son terrazas aluviales formadas por lechos de río. De manera sencilla, permite establecer el peligro a inundaciones, pudiendo tomarse los límites laterales de los depósitos aluviales (y, en menor medida, de los depósitos fluviales), que pueden indicar las alturas máximas de crecidas en el pasado. Como se muestra en la figura 1, estas planicies inundables pueden servir para definir el lecho mayor o la mayor zona de inundación que se puede esperar.

Para lograr la modelización de las crecidas fluviales a lo largo del Valle de Sula primero es necesario conocer los volúmenes de las principales corrientes, que drenan a este, mediante sus hidrogramas de respuesta.

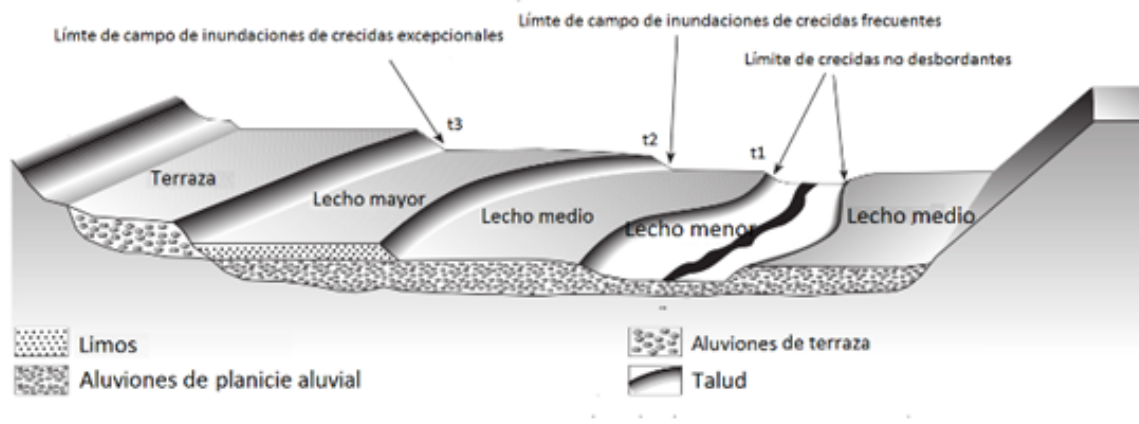


Figura 1: Análisis de planicies y lechos de inundación en los Valles. Fuente: (Hernández V., 2018)

Según Abrego (2024), el hidrograma es la representación gráfica de las variaciones de los caudales de una corriente fluvial a través del tiempo, en un punto en particular conocido como control, como respuesta a un evento pluvial con capacidad de generar escurrimiento.

Los estudios hidrológicos e hidráulico-fluviales son herramientas científicas esenciales para comprender la dinámica de las inundaciones a través del uso de software especializado, datos de alta resolución como el LiDAR y la batimetría, permitiendo la modelización de planicies inundables como un componente esencial del conocimiento del riesgo que, a su vez, fortalecería las intervenciones en el territorio como la planificación territorial y la gestión del riesgo de desastres (Abrego, 2024). A través del análisis de caudales, modelizaciones hidráulico-fluviales y la caracterización morfométrica de cuencas, se pueden identificar zonas vulnerables, estimar el peligro a inundación en distintos escenarios de retorno, facilitando el dimensionamiento del riesgo a inundaciones para realizar intervenciones en el territorio como obras de mitigación tanto estructurales como no estructurales para el reducir el riesgo a desastres (Salazar-Briones *et al.*, 2018), y fomentar el desarrollo sostenible en territorio analizado.

La validación es el proceso mediante el cual se corrobora información en campo para calibrar los modelos hidrológicos e hidráulicos. La validación en campo es un proceso que permite recopilar información valiosa en el sitio a través de testigos, huellas, indicativos y referencia de las inundaciones históricas, específicamente para el Valle de Sula. La validación en campo permite verificar información real para poder calibrar los modelos hidrológicos e hidráulico-fluviales, la calibración del modelo permite más precisión, disminuir los márgenes de error y aumentar la confiabilidad de los resultados del estudio de inundaciones fluviales.

Una óptima validación de campo se realiza en conjunto con los actores que conviven y transforman las dinámicas del territorio, Canese de Estigarribia (2022) menciona que el nuevo modelo de gestión de riesgo de desastres se basa en acciones preventivas, correctivas y reductivas del riesgo, en contraposición al modelo reactivo que apenas brinda una respuesta posterior al desastre ya ocurrido. Este nuevo modelo preventivo surge y se proyecta de forma integrada con la participación ciudadana en la gestión local del desarrollo del territorio.

Las acciones que la sociedad civil pueda emprender para la evasión, mitigación y/o superación de los riesgos por desastres se encuentran fuertemente influenciadas y mediadas por el actor Municipal que tiene

a su cargo el territorio distrital (Canese de Estigarribia, 2022). La sinergia entre los actores comunitarios y gobierno local son de suma importancia para el desarrollo de procesos directamente relacionados con el territorio.

2.2 Área de Estudio: La Zona Metropolitana del Valle de Sula (ZMVS)

La ZMVS es una de las regiones económicas más importantes de Honduras, está constituida por los centros urbanos de 20 municipalidades localizadas entre las cuencas de los ríos Ulúa Y Chamelecón. El Valle de Sula posee una extensión de 2400 km², aproximadamente, representando el 2 % del territorio nacional, concentrando la escorrentía que se genera por las superficies de aportación de los principales ríos que drenan hacia él: Ulúa y Chamelecón; como se muestra en la figura 2, la ZMVS se encuentra dentro de los límites administrativos de los departamentos de Puerto Cortés (60%), Yoro (24%) y Atlántida (16%).

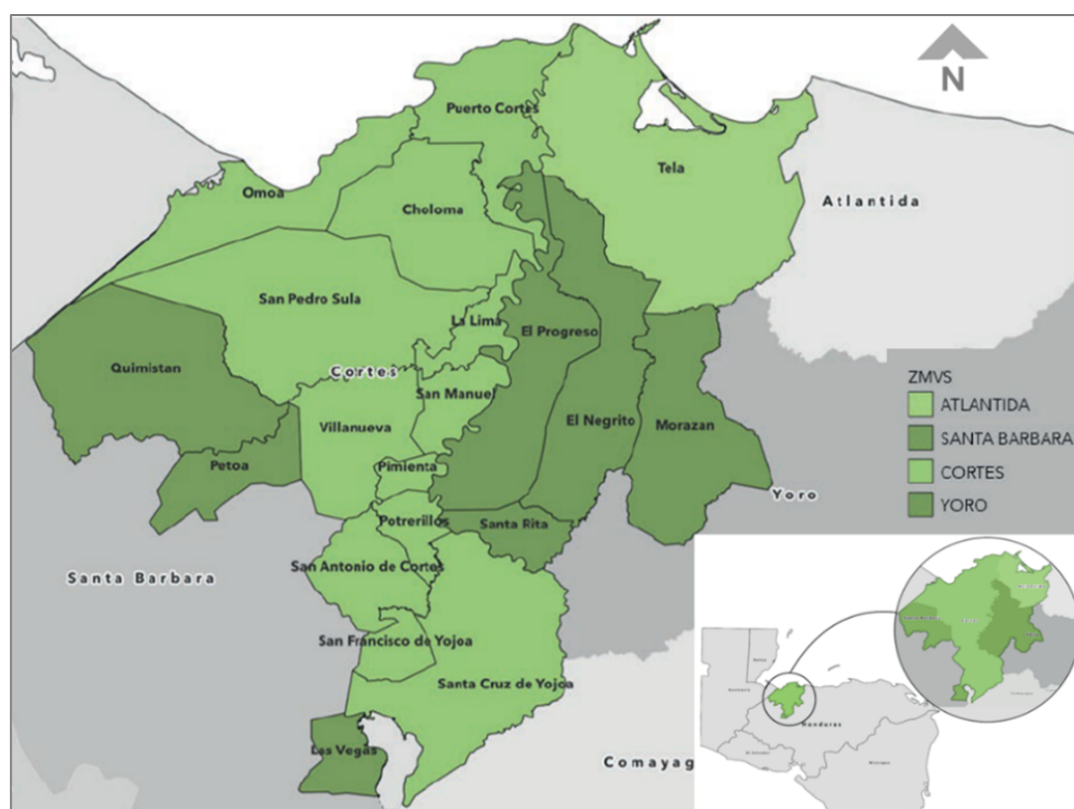


Figura 2: Ubicación y distribución de los municipios que conforman la ZMVS. Fuente: Elaboración propia.

Según Abrego (2024) los municipios de La Lima, Puerto Cortés, Pimienta, Potrerillos, San Manuel, Santa Rita y El Progreso se identifican como los municipios con mayor propensión a problemas asociados a las inundaciones. La aseveración anterior parte de la suposición de que los principales agentes modificadores del territorio responden a la acción del agua y el viento; Valle de Sula no debería ser la excepción. El problema concreto en el Valle de Sula se atribuye al acelerado crecimiento urbano sin planificación territorial, la mala administración de los recursos naturales, las limitadas capacidades de Gestión de Integral de Riesgos han incrementado los desastres por inundación fluviales. Afectando significativamente el desarrollo de la zona, que es el principal eje de desarrollo del país. Asimismo, la dificultad para desarrollar estrategias a largo plazo que permitan intervenir adecuadamente una política integral de desarrollo en el valle,

apoyadas en un robusto respaldo técnico, también restringe sobremanera la capacidad de sobreponerse a las embestidas de la naturaleza.

Como se ha demostrado en los apartados anteriores y se ilustra en la Figura 3, los impactos devastadores de los huracanes Eta e Iota revelan que los esfuerzos realizados durante las últimas dos décadas, pese a su importancia, han resultado insuficientes para abordar estos desafíos de manera efectiva.



Figura 3: Fotografías del impacto de los huracanes Eta e Iota, sobre el Valle de Sula. Las capturas fotográficas han sido tomadas a mediados de noviembre de 2020. Fuente: Periódico Digital Contra Corriente, Diario La Prensa y Chicago Tribune

2.3 Modelo hidrológico e hidráulico-fluvial inicial del Valle de Sula

Para este artículo se ha tomado de base el estudio hidrológico e hidráulico-fluvial desarrollado por [Abrego \(2024\)](#) enfocado en la respuesta a las inundaciones tomando como referencia el estudio realizado por iPresas sobre las planicies inundables de las tormentas ETA o IOTA en noviembre de 2020. El principal objetivo de este estudio fue el analizar las condiciones actuales del sistema hídrico del Valle de Sula, identificar la amenaza a inundación, áreas vulnerables, y proponer soluciones técnicas y estructurales enfocado en fortalecer los Sistemas de Alerta y Acción Temprana (SAAT) ante inundaciones en el Valle de Sula. Destaca debido a las validaciones en campo y levantamientos de batimetría para ajustar y mejorar la precisión de los modelos Hidrológicos e hidráulicos enfocado en la salvaguarda de los bienes y la vida de los pobladores del Valle de Sula. Los resultados de este estudio en conjunto con los resultados de este artículo pretenden mejorar la planificación territorial de los municipios y la gestión integral del riesgo a desastres en la región, contribuyendo así a la resiliencia frente a eventos climáticos extremos (Figura 4 y Tabla 1).

El estudio hidrológico e hidráulico-fluvial se desarrolló a partir de una combinación de trabajo de campo, recopilación de datos históricos y el uso de herramientas especializadas. El modelo hidrológico se centró en representar la relación lluvia-escorrentía, incorporando como datos de entrada un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) para delimitar superficies de aportación y características morfométricas, así como la clasificación hidrológica y de uso del suelo mediante el método del Número de Curva (CN).

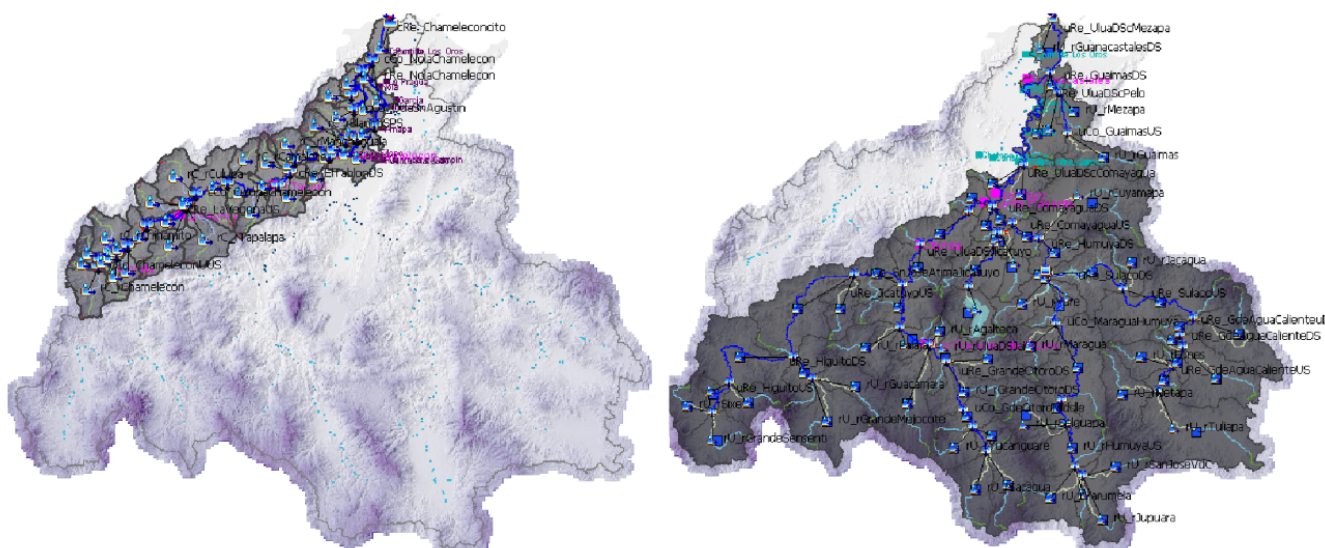


Figura 4: Modelos hidrológicos concebidos para caracterizar el comportamiento de la escorrentía superficial en el área de drenaje del Valle de Sula. Cuenca de Río Chamelecón (izquierda) y Cuenca de Río Ulúa (derecha).

Tabla 1: Parámetros del modelo hidráulico conceptual en sus diferentes niveles de escala de trabajo.

Modelo en HEC-RAS	Área de análisis	Malla			Intervalo de cómputo, s	
		Min, m ²	Máx, m ²	Celdas		
Río Chamelecón en La Lima	110	1.5	2.1x10 ⁴	18x10 ⁴	139	2
Río Ulúa en El Progreso	235	1.0	15x10 ⁴	68x10 ⁴	292	5
Valle de Sula	1980	4.0	40x10 ⁴	123x10 ⁴	225x10 ⁴	20

* Modelos en HEC-RAS para diferentes escalas de trabajo: 1:50 000 para los modelos de La Lima y El Progreso, y 1:400 000 para todo el Valle de Sula. Fuente: Elaboración propia.

A su vez, se definieron tormentas de diseño, a partir de análisis de frecuencias de eventos históricos, y se calcularon los tiempos de concentración usando fórmulas como Kirpich y el método del *Technical Release* No. 55 (TR-55). En cuanto al modelo hidráulico-fluvial, se apoyó en levantamientos topográficos mediante LiDAR y batimetría con sonar, estimaciones del coeficiente de rugosidad de Manning a través del método de Cowan, y modelizaciones hidráulicas de alta precisión con refinamiento de mallas y líneas de ruptura. Las simulaciones incluyeron eventos como el Huracán Eta y escenarios con periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Finalmente, la validación del modelo frente a datos reales permitió identificar zonas inundables, velocidades de flujo y establecer umbrales para sistemas de alerta temprana en puntos clave de los ríos Ulúa y Chamelecón.

3 Metodología

El enfoque científico utilizado es cuantitativo y correlacional (Hernández-Sampieri *et al.*, 2014), dado que la metodología empleada adopta una aproximación integral, involucrando la recolección y análisis de da-

tos, tanto históricos como recientes, la recopilación empírica de datos mediante entrevistas y mediciones directas en campo, el empleo de avanzadas técnicas de modelado y la validación de los resultados de las simulaciones de datos obtenidos en campo para validar el modelo hidrológico e hidráulico a través de un método estadístico específico, conocido como coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe que permitió evaluar objetivamente la consistencia interna y la fiabilidad del modelo.

La Figura 5 muestra cuatro fases de la metodología empleada: (1) recopilación y análisis de datos, (2) proceso de validación en campo, (3) calibración del modelo hidrológico mediante los datos obtenidos en campo y (4) clasificación de los resultados.



Figura 5: Pasos metodológicos para el desarrollo del artículo. Elaboración propia.

3.1 Recopilación y análisis de datos

Se realizó una recopilación y análisis de las contribuciones previas que permiten robustecer este proceso metodológico (ver Tabla 1). Los actores clave en este proceso fueron Centro de Estudios y Desarrollo del Valle de Sula (CEDVS), Centro de Estudios Atmosféricos, Oceanográficos y Sísmicos (CENAOS) de la Secretaría de Gestión de Riesgos y Contingencias Nacionales (COPECO) y Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (Ver Tabla 2).

3.2 Proceso de Validación

El proceso de validación de datos en campo se dividió en cuatro partes que se detallan a continuación:

3.2.1 Identificación de sitios críticos en el Valle de Sula

Se realizó un taller de identificación de sitios críticos en el Valle de Sula (Figura 6), priorizando 29 sitios críticos durante las tormentas ETA y IOTA a lo largo de la planicie de inundación que forma el Río Chamelecón y Ulua en la parte baja de cuenca en el Valle de Sula. En este proceso los actores clave fueron la red de Comités de Emergencia Municipal (CODEM), COPECO Regional #2, CEDVS; en este taller participaron 32 técnicos (11 mujeres y 21 hombres).

3.2.2 Selección de variables

La selección de las variables responde a la herramienta de categorización de la amenaza por inundación, desarrollado por el *Australian Rainfall & Runoff* a través de un reporte titulado *Appropriate Safety Criteria*

Tabla 2: Documentos y datos consultados. Fuente: Elaboración Propia

Nombre	Año	Formato de información proporcionada		
		PDF	Geoespacial	Excel
Plan Maestro para el Desarrollo Integral y Control de Inundaciones en el Valle de Sula	Harza-CINSA, 1978	X		
Informe de actividades de la Unidad de Hidrología Básica	Centro de Estudios y Desarrollo del Valle de Sula, 1994	X		
Estudios de caracterización territorial en el Valle de Sula	Proyecto de Gestión de Riesgos de Desastres, 2016	X	X	
Modelo digital de terreno con tecnología Light Detection and Ranging (LiDAR) Valle de Sula, resolución espacial 1 metro			X	
Tesis sobre la Actualización Preliminar de los Umbrales de Alerta por inundación del Río Chamelecón en la ciudad de la Lima	Abrego (2024)	X		
Análisis de Inundaciones en San Pedro Sula	Universidad Naciones Unidas, 2020	X		
Revisión y definición de obras de protección frente a inundaciones en el Valle de Sula	iPresas (2021)	X		
Precipitaciones de Eta e Iota en 39 estaciones con registros de corta duración, distribuidas en el área de drenaje del Valle de Sula y sus alrededores	CENAOS, 2023			X
Niveles de escalas limnimétricas	Hydrometeorological Automated Datasystem - National Weather Service NOAA, 2023		X	X

for People (Cox *et al.*, 2010) utilizado en el modelo hidráulico-fluvial inicial ([Abrego, 2024](#)).

Este instrumento se utilizó atendiendo la necesidad de determinar la peligrosidad de las crecidas de una corriente asociada a la energía con la que los flujos discurren por el terreno. En términos muy generales, las inundaciones pueden clasificarse como estáticas o dinámicas, en función del comportamiento de sus flujos, siendo las últimas las más devastadoras. Diversas han sido las propuestas para establecer los criterios utilizados para categorizar la peligrosidad de una corriente, sin embargo, en la actualidad, muchos autores coinciden en que la profundidad de las inundaciones, en conjunto con sus velocidades, son los



Figura 6: Fotografías de los ejercicios realizados con la Red de CODEM para identificación de sitios. Fuente: Galería Proyecto Barrio Resiliente Valle de Sula.

factores más relevantes para definir la amenaza de estos eventos fluviales. La Tabla 3 describe las variables seleccionadas (los rangos de profundidad y permanencia se tomaron de [iPresas \(2021\)](#)).

Tabla 3: Sitios Críticos identificados. Fuente: Elaboración propia

No.	Variable	Descripción	Unidad	Tipo validación	
				MF	PC
1	Profundidad	Medida desde el suelo hasta la marca de inundación. Rango 0.3-4 m	Altura del agua en metros	X	
2	Permanencia	Anegamamiento o estancamiento del agua en la zona afectada. Rango: 2 a más de 14 días	Duración en días		X
3	Velocidad	Fuerza percibida del agua, medida en una escala de 1 (muy baja) a 5 (muy alta)	-		X

MF = Medición física. PC = Percepción comunitaria

3.2.3 Identificación de la herramienta de recolección de datos

En base a la medición de las variables previamente de desarrollo el proceso de identificar la aplicación tecnológica que fuese idónea a ser usada como herramienta para la recolección de datos y que sirvieran

para la validación de los mismos, y en la cual el instrumento diseñado (encuesta) pudiese ser implementado, para ello se diseñó un cuestionario como instrumento de recolección de datos y se eligió la aplicación [KoboToolbox \(2025\)](#), una plataforma de recopilación, gestión y visualización de datos de código abierto para la acción humanitaria, el desarrollo, la protección del medio ambiente, la consolidación de la paz y los derechos humanos.

El uso de herramientas como *KoboToolbox* permitieron recopilar datos georreferenciados sobre las inundaciones, lo que facilita la integración de la información en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para análisis y planificación.

3.2.4 Aplicación del instrumento

En coordinación y apoyo de docentes de estudiantes de la Facultad de Ciencias Espaciales (FACES) de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), COPECO Regional #2 y la Red de CODEM, se visitaron los 29 sitios críticos identificados (Figura 7). Durante las visitas se realizó el levantamiento del instrumento realizando consultas rápidas con la población de la zona para determinar la dinámica de la inundación. En este proceso participaron 20 alumnos de las asignaturas de Geografía Física de Honduras, Infraestructura de Datos Espaciales, Cartografía y Fundamentos de Sistemas de Información Geográfica.



Figura 7: Fotografías del recorrido de campo y levantamiento de información utilizando la herramienta *KoboToolbox*.

3.3 Estimación del desempeño del modelo hidráulico-fluvial

La valoración del rendimiento de los modelos, sean estos hidrológicos o hidráulicos, puede realizarse a través de estimadores del desempeño de estos con respecto a las observaciones realizadas en campo. En modelos orientados a la evaluación de planicies inundables, los niveles o calados de las crecidas pueden ser utilizados en sustitución de los caudales, como variable a evaluar. Frente a ello, se ha acudido al criterio de evaluación de desempeño propuesto por Nash-Sutcliffe (NSE), y aplicado a modelos hidrometeorológicos e hidráulico-fluviales ([Duc y Sawada, 2023](#)), en su forma original, se detalla a continuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$$

Donde:

Q_0^t son los valores observados, Q_m^t los valores simulados, \bar{Q}_0 es el promedio de observaciones.

De igual forma, el rango de desempeños aceptados en simulaciones hidráulico-fluviales se muestra a través de la Tabla 4.

Tabla 4: Criterios de desempeño evaluadas en el rango de desempeños de simulaciones. Fuente: HEC (2011).

Evaluación del desempeño	NSE	R ²
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$R^2 \geq 0.85$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.70 \geq R^2 \geq 0.85$
Satisfactorio	$0.50 < NSE < 0.65$	$0.50 \geq R^2 \geq 0.70$
No satisfactorio	$NSE \leq 0.50$	$R^2 \leq 0.50$

R² = Coeficiente de determinación

Si bien se ha proporcionado el valor del desempeño del modelo, posterior a las evaluaciones, no se consideró necesario evaluar el coeficiente de determinación en vista que, para modelos hidrológicos de inundación, el NSE resulta más favorable, siendo el R² más apropiado su uso a regresiones de lluvia o series temporales, cuando aplica.

Los procesos de modelamiento hidrológico e hidráulico se desarrollaron en las plataformas *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System* por sus siglas en inglés (HEC-HMS) y *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System* por sus siglas en inglés (HEC-RAS), ambos son software libre de ingeniería hidrológica e hidráulica desarrollada por el *Hydrologic Engineering Center* del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

3.4 Clasificación de resultados

Los resultados se exponen en dos áreas. Los obtenidos durante el levantamiento de información en campo y los obtenidos como resultado de la integración de los datos de campo para la calibración o evaluación del modelo hidráulico-fluvial.

Tabla 5: Ubicación de sitios críticos y su correspondencia con la distribución de grupos de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Grupo	Lugar	Aldea	Municipio	Departamento	Este, m	Norte, m
1	Bijao	Río Bijao	Choloma	Cortés	410145	1736596
1	La Fragua	Kilómetro 45	El Progreso	Yoro	413968	1734027
1	Toloa	Toloa Creek	Tela	Atlántida	417800	1742327
1	Chameleconcito	Chameleconcito	Puerto Cortés	Cortés	407433	1730577
1	La Unión	Villafranca	Tela	Atlántida	418125	1741201
2	El Negrito	Battán	El Negrito	Yoro	421056	1721174
2	Aldea La 29	La Veinte y Nueve	El Negrito	Yoro	421056	1721174
2	Urraco	Kilómetro 45	El Progreso	Yoro	413900	1734596
2	Cofradía	Cofradía	San Pedro Sula	Cortés	377408	1703663
2	Green Valley	Agua Sucia	Quimistán	Santa Bárbara	371049	1696937
2	Escuela 4 de Marzo	Cuatro de Marzo	El Progreso	Yoro	409621	1700510
2	Chumbas	Campo Amapa	El Progreso	Yoro	412002	1715316
2	Crematorio La Lima	Flor de Oriente	La Lima	Cortés	408321	1711651
2	Sector Bananero La Lima	Col. La Guadalupe	San Manuel	Cortés	407514	1704037
2	Campo La Buena Fe	Villanueva	Villanueva	Cortés	395106	1692347
2	Campo 1 de Mayo	Villanueva	Villanueva	Cortés	392694	1691743
2	Pueblo Nuevo	Pimienta	Villanueva	Cortés	391027	1689360
2	Valle de Naco	La Acequia	Quimistán	Santa Bárbara	375092	1698677
3	La Ceibita	La Ceibita	Quimistán	Santa Bárbara	365613	1693053
3	Potreriillos	Potreriillos	Potreriillos	Cortés	396389	1684308
3	Potreriillos	El Manacal	Potreriillos	Cortés	396917	1680308
3	Choloma	Río Bijao	Choloma	Cortés	400941	1736971
3	Aldea La 29	La Veinte y Nueve	El Negrito	Yoro	421056	1721176
3	Col Metálicas	Flor de Oriente	La Lima	Cortés	408164	1711698
3	Col. La Guadalupe	Col. La Guadalupe	San Manuel	Cortés	407571	1704316
3	Col. Cuatro de Marzo	Cuatro de Marzo La Guadalupe	El Progreso	Yoro	409621	1700510

4 Resultados

4.1 Validación en sitios críticos

En la Tabla 5, se presentan los resultados de selección de sitios críticos y como se muestra en la figura 8 su distribución en el Valle de Sula. Para lograr finalizar el levantamiento se organizaron tres grupos de trabajo, procurando abarcar los sectores más críticos del Valle de Sula, detallados a través de la siguiente ilustración:

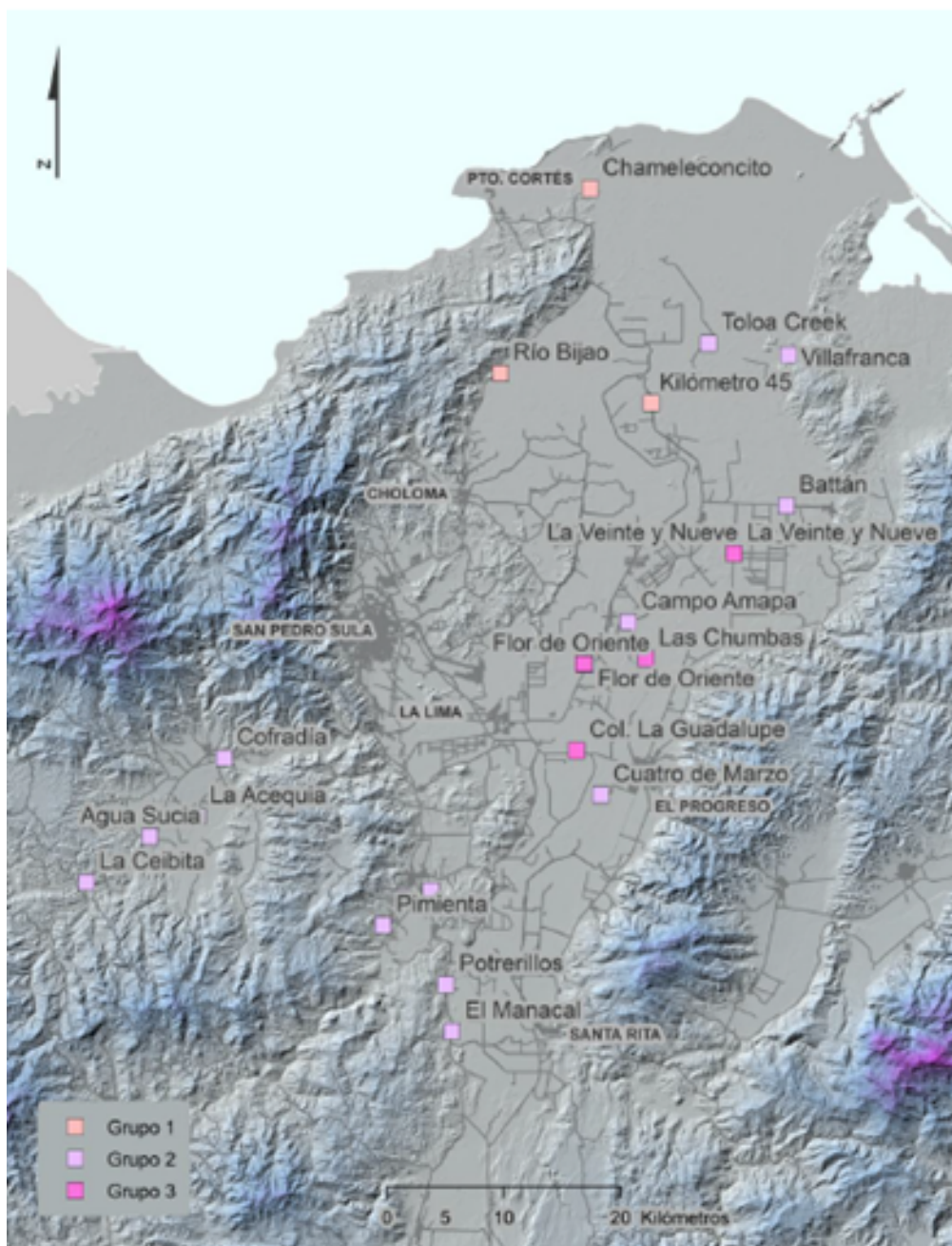


Figura 8: Simulación de la crecida ante el paso de ETA sobre el Valle de Sula. Distribución espacial de las profundidades (izquierda) y las velocidades (derecha).

4.1.1 Profundidad del agua

En algunas zonas, como la Aldea Las Metálicas, en La Lima, el agua alcanzó alturas de hasta 10 metros, lo que causó daños significativos en las viviendas y la infraestructura local. En contraste, en las aldeas La 29, La 39 y La 40 en El Negrito, la profundidad del agua fue de apenas 0.5 metros.

Los resultados reflejan que el 83 % de los encuestados experimentó inundaciones severas, con niveles que alcanzaron hasta 4 metros de altura. Los datos también indicaron que el 67 % de los afectados no estaban preparados para eventos climáticos adversos, enfatizando la necesidad de mejores protocolos de respuesta y prevención.

El 67 % de las áreas inundadas alcanzaron su altura máxima en cuestión de horas, y el 67 % tuvo una profundidad hídrica de menos de 4 metros.

4.1.2 Permanencia del agua

En las zonas más afectadas, como el estadio de La Lima y la Aldea Las Metálicas, el agua permaneció estancada entre 20 y 60 días, lo que provocó graves problemas de erosión del suelo y afectó la agricultura local.

4.1.3 Velocidad del flujo

En áreas como la Aldea 4 de Marzo y la Colonia Guadalupe, la velocidad del agua fue tan alta que arrastró animales, vehículos y, en algunos casos, personas. En otras zonas, como las aldeas La 29, La 39 y La 40, la velocidad del flujo fue menor, lo que redujo el impacto destructivo.

La velocidad hídrica de Eta e Iota fue lo suficientemente fuerte como para arrastrar casas, carros y personas, según el 67 % de los entrevistados. La comunicación de la emergencia se realizó principalmente de boca en boca (80 %) y a través de televisión y radio (20 %).

4.2 Estimación del desempeño del modelo hidráulico-fluvial

El Valle de Sula posee un área de drenaje de 26,370 km², representando un 24 % del territorio nacional, aproximadamente, donde las principales corrientes fluviales que discurren a través de la extensa planicie que lo conforman son los ríos Ulúa y Chamelecón. Posterior a su arribo al Valle de Sula, es Río Ulúa la corriente que recibe los mayores aportes, siendo los ríos Comayagua y Guaimas los más relevantes.

El modelo hidráulico conceptual del Valle de Sula es una representación simplificada del sistema hídrico de la región, que integra los componentes clave de su dinámica de inundaciones para evaluar riesgos y apoyar la gestión del territorio (ver Figura 9).

Ante el paso de los huracanes Eta e Iota, la respuesta de las corrientes fue registrada a través de algunas estaciones hidrométricas que están en operación: El Tablón y Chinda. Los hidrogramas registrados ante el paso de los huracanes se detallan en la Figura 10.

Diversas fueron las simulaciones realizadas a través del modelo hidráulico-fluvial, donde el coeficiente de rugosidad fue modificado con el propósito de mejorar la representación de la planicie de inundación ante el paso de los huracanes. Los mayores desafíos corresponden a la valoración de los coeficientes de rugosidad en las franjas urbanas, donde los valores oscilaron entre 0.080, para zonas urbanas no continuas, como es el caso de lagunas colonias de la ciudad de El Progreso, y 0.120 para zonas con alta densidad urbana, como en el caso de algunos sectores de la ciudad de La Lima.

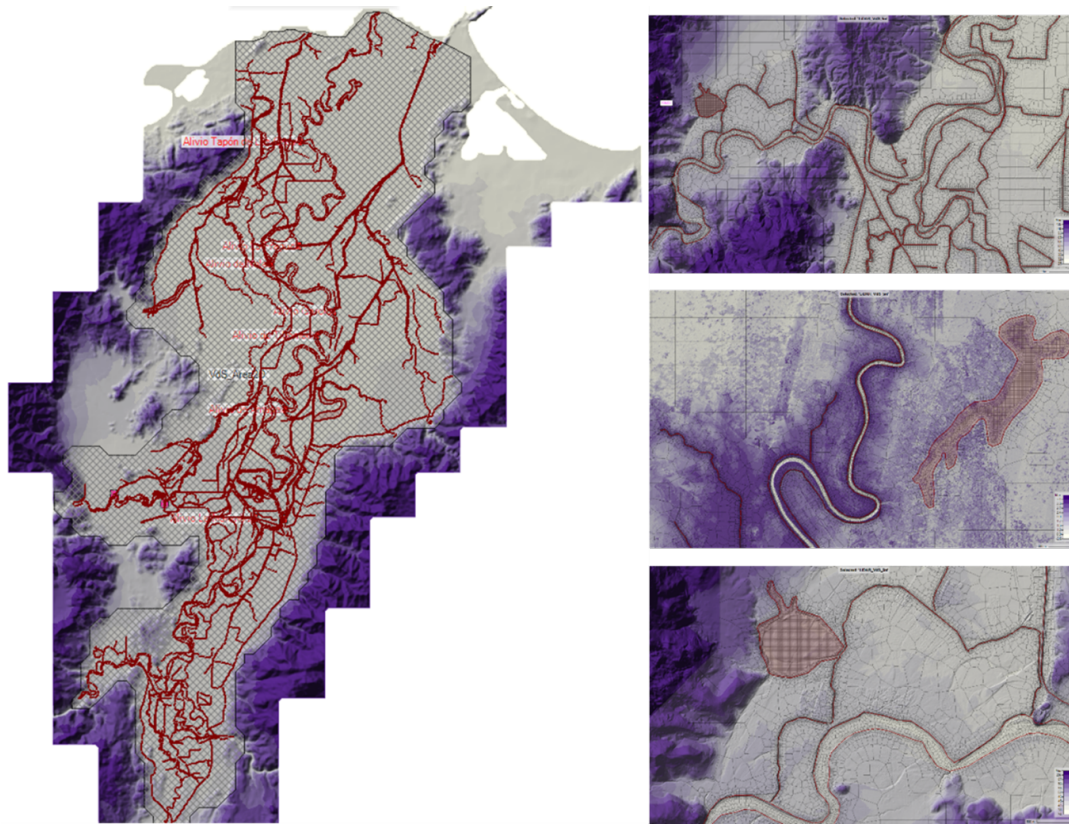


Figura 9: Modelo hidráulico conceptual del Valle de Sula. Fuente: Abrego (2024).

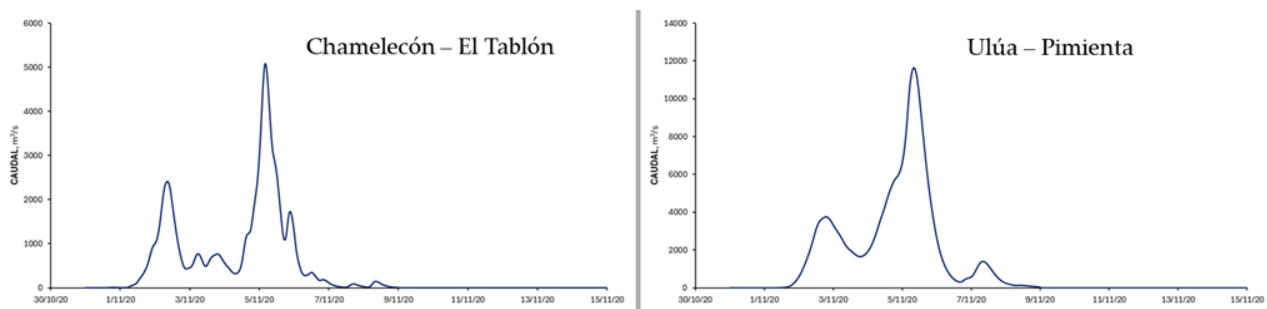


Figura 10: Hidrogramas a nivel horario de Río Chamelecón en la Estación Hidrométrica El Tablón y de Río Ulúa en Estación Hidrométrica Chinda, trasladado en las inmediaciones de Pimienta. Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas como consecuencia de la intromisión de las crecidas en el tejido urbano resultan más sensibles a los espesores de inundación mayores, donde la alta variabilidad de la geometría del terreno acentúa la fricción, reduciendo considerablemente las velocidades en estas zonas. Este aspecto recibió la mayor atención posible, en vista que la mayoría de los puntos críticos de los bordos fueron identificados, en campo, muy próximos a algunas colonias que manifiestan la mayor densidad de estructuras por unidad de superficie.

Con respecto a los resultados del desempeño final del modelo hidráulico-fluvial, la última simulación muestra que las observaciones participativas realizadas en el proceso de validación en contraste con los resultados del modelo hidráulico sitúan la modelización hidráulica fluvial en el rango como **buena**.

$$NSE = 1 - \frac{38.35}{138.40} = 0.72$$

La Figura 11 nos detalla los resultados de las planicies inundables en el Valle de Sula, como consecuencia del paso de los Huracanes Eta e Iota, donde puede apreciarse la magnitud de los calados obtenidos en los principales centros poblados, por el tamaño de su población, que conforman la Zona Urbana del Valle de Sula. En ella, se puede apreciar que tanto Río Ulúa como Río Chamelecón poseen segmentos donde se evidencian marcados procesos de acreción vertical en sus lóbulos de derrame, observados específicamente en sectores como Guanchías y el Canal Martínez, en el caso de Río Ulúa; y los Bajos de La Lima y Bajos de Choloma, próximos a la comunidad de Baracoa, en lo concerniente a Río Chamelecón.

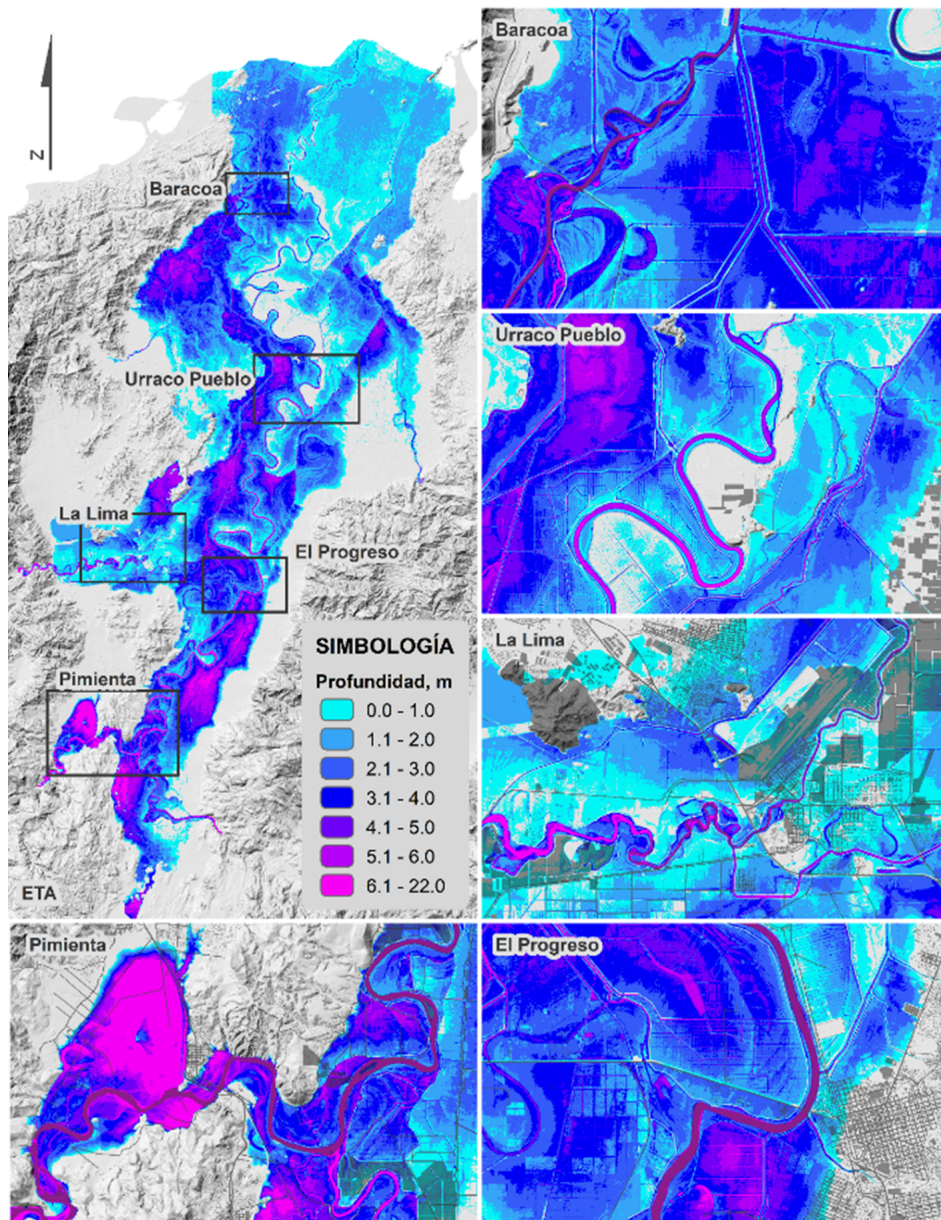


Figura 11: Mapa resultado de la evaluación de desempeño del modelo hídrico - fluvial en el Valle de Sula. Fuente: Elaboración propia.

Esta situación, ha sido confirmada con los relatos y evidencias en campo, que fueron satisfactoriamente reproducidos por el modelo hidráulico-fluvial, pudiendo interpretarse que la compleja red de drenaje del valle ha sido, en términos generales, reproducida de forma satisfactoria, evidenciado por la evaluación del desempeño mediante un $NSE = 0.72$.

5 Discusión

Los resultados indican que todas las zonas evaluadas fueron afectadas por las inundaciones provocadas por los huracanes Eta e Iota. La Aldea Las Metálicas en La Lima fue la más afectada, con niveles de agua que alcanzaron hasta 10 metros de profundidad y una permanencia de 60 días. En contraste, las Aldeas La 29, La 39 y La 40 en El Negrito experimentaron inundaciones menores, con niveles de agua de 0.5 metros y una permanencia de 15 a 20 días. La velocidad del flujo fue difícil de medir, pero se observó que en áreas como La Aldea 4 de Marzo y la Colonia Guadalupe, el agua tuvo suficiente fuerza para arrastrar vehículos y estructuras. En contraste, en las Aldeas La 29, La 39 y La 40, la velocidad del flujo fue menor, lo que redujo el impacto destructivo. Si bien es cierto, la evaluación de estimadores del desempeño del modelo hidráulico-fluvial con respecto a las observaciones realizadas en campo, brinda resultados favorables ($NSE=0.72=BUENA$), podría mejorarse con observaciones para cada evento ocurrido, estableciendo un monitoreo y registro de las huellas de inundación que resultan en un tesoro para los técnicos dedicados a la conceptualización de modelos hidráulicos, ante la ausencia de observaciones registradas con todo el rigor técnico requerido. Asimismo, la observación de más eventos permitiría ajustar los parámetros de calibración de los modelos de forma apropiada a las condiciones del entorno, una vez se disponga de eventos en forma de pronósticos para su simulación, favoreciendo la oportuna estrategia de toma de decisiones.

Para finalizar este apartado, se aclara al lector que las velocidades no han sido objeto de evaluación debido a que la información suministrada es de carácter subjetivo, y con amplios rangos de valoración, por lo que resultaría en un infructuoso esfuerzo, ante la ausencia de instrumentos para su correcta medición.

El análisis de los resultados demostró algunas diferencias entre los modelos cartográficos existentes y la información obtenida en campo. Esto sugiere que, aunque los datos previos fueron útiles, es crucial mejorar continuamente la precisión de los mapas de riesgos, especialmente en áreas vulnerables como el Valle de Sula. La respuesta de la comunidad y la intervención de ONG como GOAL y donantes como USAID fueron fundamentales, pero subrayaron la necesidad de fortalecer la resiliencia comunitaria.

Las lecciones aprendidas de estas tormentas resaltan la crucial necesidad de mejorar la preparación frente a desastres naturales. La educación ambiental, así como la colaboración interinstitucional entre organismos gubernamentales y comunitarios, es fundamental para abordar los riesgos de inundación de manera eficiente.

La deforestación agrava las inundaciones, destacando la importancia de la educación ambiental y limpiezas comunitarias. La construcción de infraestructura resiliente y la planificación urbana sostenible son cruciales. Así mismo, la cooperación interinstitucional es fundamental para estrategias efectivas de prevención y mitigación.

6 Conclusiones

El estudio reafirma la importancia de contar con datos precisos y actualizados para la gestión de riesgos en zonas propensas a inundaciones. La evidencia sugiere que se deben implementar medidas más efectivas

para mitigar el impacto de futuros desastres, e incluir a las comunidades en estos procesos de forma activa.

La evaluación subraya la importancia de adoptar estrategias de mitigación que incluyan una adecuada gestión de recursos hídricos y una planificación urbana sostenible. Es necesario fortalecer los sistemas de alerta temprana y fomentar la cooperación entre las comunidades y agencias de gestión de desastres para una respuesta más efectiva ante futuros fenómenos climáticos.

El uso de tecnologías de mapeo de llanuras de inundación, incluyendo fotogrametría, LiDAR y Radar, es fundamental para mejorar la precisión y calidad de los datos utilizados en el mapeo de llanuras de inundación en el Valle de Sula. Así mismo es importante la validación de estos modelos mediante técnicas como la Cartografía Participativa, para ajustar los modelos hidrológicos a la realidad de campo.

Las velocidades de flujo no han sido objeto de evaluación debido a que la información suministrada es de carácter subjetivo, y con amplios rangos de valoración, por lo que resultaría en un infructuoso esfuerzo, ante la ausencia de instrumentos para su correcta medición.

7 Recomendaciones

Se recomienda mejorar la infraestructura de defensa contra inundaciones, realizar mantenimientos regulares de bordos y crear una base de datos accesible sobre amenazas y riesgos. Además, es vital promover programas de educación y concienciación que empoderen a las comunidades para que se preparen adecuadamente ante desastres. Se proponen varias estrategias de gestión de riesgos que incluyen Mejora de infraestructuras para drenaje y control de inundaciones, zonificación territorial adecuada para regular construcciones en áreas con riesgo elevado, implementación de sistemas de alerta temprana que utilicen datos climáticos para prevenir a las comunidades y reducir la vulnerabilidad de la región proteger vidas y recursos durante eventos climáticos extremos. Se recomienda mejorar la identificación y comprensión de los riesgos de desastres mediante evaluaciones y análisis, así como mejorar la gestión de crisis mediante pronósticos y gestión de desastres.

Es necesario contar con información actualizada y mapas de amenaza y riesgo de acceso público, incorporando nuevos enfoques y considerando las modificaciones en las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

La gestión racional de las llanuras aluviales y la estimación de los daños por inundación no sólo dependen de la extensión del agua, sino también de la profundidad y la frecuencia de las inundaciones. A la vez, también la profundidad y frecuencia con que se inundan los edificios. Si la tarea de la gestión nacional de las inundaciones se observa en este contexto más amplio, es fundamental disponer de información precisa sobre la superficie del terreno y la elevación de la superficie de las aguas de crecida ([National Research Council, 2007](#)).

Las inundaciones urbanas, causadas por lluvias inusualmente intensas y fallos en el drenaje de las aguas pluviales, son cada vez más frecuentes y graves en muchas ciudades del mundo. La mayoría de los estudios anteriores se centraron en las inundaciones causadas por lluvias intensas y prestaron poca atención a las inundaciones causadas por fallos del sistema de drenaje. Sin embargo, la contribución del sistema de drenaje a la vulnerabilidad a las inundaciones ha aumentado con el tiempo a medida que envejecían y se volvían inadecuados para manejar las inundaciones de diseño ([GebreEgziabher y Demissie, 2020](#)).

8 Referencias

- Abrego, C. (2024). Estudio hidrológico e hidráulico-fluvial sobre las planicies inundables en la zona metropolitana del valle de sula. Technical report, USAID-GOAL.
- Canese de Estigarribia (2022). *Participación ciudadana en la gestión y reducción de riesgos de desastres en la Región Metropolitana de Asunción, Paraguay*. Proceedings del XI Congreso Latinoamericano de Ciencia Política (ALACIP). Santiago, Chile.
- CEPAL (2021). Evaluación de los efectos e impactos causados por la tormenta tropical Eta y el huracán Iota en Honduras. Technical report, BID. Recuperado de: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/91034cc8-b36b-4dd0-aeda-ddf90e655d15/content>.
- Cox, R., Shand, T., y Blacka, M. (2010). Australian rainfall and runoff. revision project 10: Appropriate safety criteria for people. Technical report, Engineers Australia. Recuperado de: https://arr.ga.gov.au/__data/assets/pdf_file/0006/40578/ARR_Project_10_Stagel_report_Final.pdf.
- Duc, L. y Sawada, Y. (2023). A signal-processing-based interpretation of the nash–sutcliffe efficiency. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(9):1827–1839.
- GebreEgziabher, M. y Demissie, Y. (2020). Modeling urban flood inundation and recession impacted by manholes. *Water*, 12(4). doi: <https://doi.org/10.3390/w12041160>.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., y Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education, 6 edición.
- Hernández V., N. (2018). El río y su territorio. Espacio de libertad: un concepto de gestión. *Terra. Nueva Etapa*, XXXIV(56).
- iPresas (2021). Reporte final de revisión y definición de obras de protección frente a inundaciones en el Valle de Sula (Honduras). Technical report, BID.
- KoboToolbox (2025). The KoboToolbox software. Recuperado de: <https://www.kobotoolbox.org/about-us/software/>.
- National Research Council (2007). *Elevation Data for Floodplain Mapping*. The National Academies Press.
- Salazar-Briones, C., Hallack-Alegría, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomelí, M., López-Lambraño, A., y Salcedo-Peredia, A. (2018). Modelación hidrológica e hidráulica de un río intraurbano en una cuenca transfronteriza con el apoyo del análisis regional de frecuencias. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(4). doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-03>.
- Suárez, G. (2013). *Manual para la evaluación del Riesgo del emplazamiento y medio construido*. PNUD. ISBN: 978-99926-821-4-2.