

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**SIMULACIÓN DE CRECIDAS REPENTINAS EN LA AMAZONÍA
ECUATORIANA CON DATOS ESCASOS**

JORGE HURTADO P.¹
OSCAR LINK L.²

RESUMEN

La aplicación de modelos hidrológicos e hidrodinámicos en la evaluación de riesgos de inundaciones repentinas enfrenta limitaciones por la falta de sistemas de monitoreo sólidos y observaciones hidrometeorológicas de largo plazo. Algunos estudios han demostrado que los esquemas de modelación acoplada, basados en el muestreo de eventos cortos, pueden ayudar a solventar la falta de datos observados en el largo plazo. Este estudio evaluó el uso de eventos de tormenta y levantamientos en terreno de puntos de control, para desarrollar y validar un esquema de modelación en la evaluación de la peligrosidad de inundaciones repentinas en cuencas con escasez de datos. Se acopló el modelado hidrológico HEC-HMS con el modelo hidráulico Nays2Dflood para simular la respuesta ante eventos extremos de tormentas, incluyendo una que inundó la Ciudad de Tena (Ecuador) en septiembre de 2017. El enfoque de acoplamiento mostró un buen rendimiento al simular caudales y niveles ($0.40 \leq \text{coeficiente Nash-Sutcliffe} \leq 0.95$; $-4\% \leq \text{Sesgo porcentual} \leq 23\%$) en seis de ocho eventos utilizados durante la calibración y la validación. Además, se encontró un buen nivel de concordancia entre las áreas simuladas y observadas de la inundación pasada (Índice F = 0.8). La metodología propuesta se puede usar para evaluar el impacto de inundaciones en cuencas con datos escasos y establecer sistemas de pronóstico de inundación a nivel local.

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile – email:jorgehurtado@udec.cl

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile – email: olink@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de peligros naturales, como inundaciones repentinas, sigue siendo un desafío en ciencias ambientales (Jain et al., 2018). Las inundaciones por lluvias extremas relacionadas al cambio climático han aumentado (IPCC, 2021). El desarrollo de medidas para reducir impactos y proteger infraestructura es crucial. Modelos numéricos son confiables para evaluar estos peligros. Específicamente, modelos hidrológicos e hidrodinámicos se aplican para describir dinámicas y proyectar impactos. Por un lado, los modelos hidrológicos (HEC-HMS, SWAT) simulan los procesos de lluvia-escorrentía a escala de cuenca (Jain et al., 2018). Por otro lado, los modelos hidrodinámicos (LISFLOOD-FP, IBER, Nays2DFlood) representan las velocidades y niveles de agua tanto en canales como llanuras de inundación, generalmente a escala de tramo fluvial (Bates & De Roo, 2000; Bladé et al., 2014; Shimizu et al., 2015). Debido a que ambos tipos de herramientas actúan a escalas diferentes, una opción válida es trabajar con modelos acoplados para combinar las ventajas de ambos tipos de modelos (Mishra et al., 2018). Sin embargo, los modelos requieren de datos hidrometeorológicos de largo plazo (Boongaling et al., 2018). Estas características limitan su implementación en países en desarrollo donde no existen redes robustas de monitoreo hidrometeorológico.

En este contexto, el muestreo de tormentas aisladas puede ser suficiente para la modelación de crecidas bajo ciertas condiciones (Alicia Correa et al., 2016; Reynolds et al., 2019). Por ejemplo, cuando la variabilidad espacial de un determinado evento de precipitación sea relativamente homogénea (Nikolopoulos et al., 2011; Perdigão & Blöschl, 2014). También, la modelación hidrológica usando tormentas aisladas puede ser útil en zonas donde las estaciones meteorológicas son escasas y dispensas o no tienen mucho tiempo de operación como es el caso de la Amazonía Ecuatoriana (Hurtado-Pidal et al., 2020). Por lo tanto, este estudio evaluó el uso de tormentas aisladas y datos de terreno de inundaciones en un esquema de modelación acoplada con datos escasos. Los modelos acoplados fueron el modelo hidrológico HEC-HMS y el modelo hidráulico Nays2DFlood, para simular caudales, niveles y velocidades de flujo, tanto en canales, como en llanuras de inundación del río Tena en Ecuador. Además, se evaluó la capacidad de los modelos acoplados para simular una inundación ocurrida el 2 septiembre de 2017 en la ciudad de Tena. Los resultados pueden aplicarse en cuencas similares con datos escasos.

2. MÉTODOS

2.1. ZONA DE ESTUDIO

El estudio abarca las subcuencas del Río Tena (TENA) y Río Pano (PANO), que convergen en la ciudad de Tena (Napo, Ecuador) y tienen 235 km² de área (Figura 1). Las cuencas tienen un fuerte gradiente topográfico (500 a 2500 msnm; Figura 1c). Cada río tiene 28 km (TENA) y 25 km (PANO) de longitud, y una pendiente media de 7%. El tramo fluvial para el análisis de la inundación tiene 1.7 km de río (Figura 1d) con pendiente 0.03%. El ancho medio de la sección es 50 m, con un lecho con gravas (~5 cm) y cantos rodados (~25 cm). Los suelos de la cuenca clasificados como *Andisoles*, son principalmente arcillo-arenosos en la parte alta y franco-arenosos en la parte baja. La cobertura del suelo tiene 87% de bosque (primario y secundario), el cual está principalmente en la parte alta. El 13 % restante son

coberturas agropecuarias e infraestructura que se ubican en la parte baja de la cuenca. Finalmente, el clima corresponde al de bosque húmedo tropical (Köppen; Af). Precipitación anual es de 3500 mm y la temperatura media anual de 24 °C.

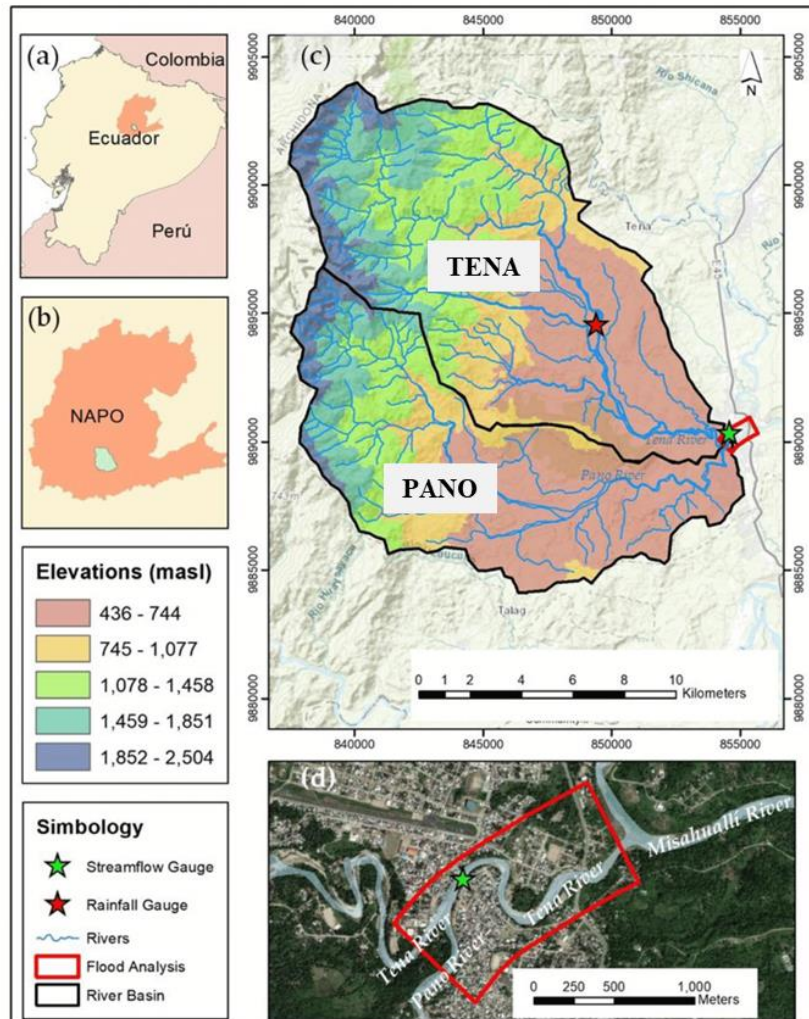


Figura 1. Zona de estudio. a) Ubicación en Ecuador; b) ubicación en la provincia; c) elevaciones en la cuenca, estaciones de aforo de lluvia (marca roja) y caudal (marca verde); d) área utilizada para la evaluación de la peligrosidad de inundaciones (polígono rojo) en la ciudad de Tena (Ecuador). Modificado de Hurtado-Pidal et al., (2020)

2.2. DATOS

La información geográfica utilizada fue del proyecto nacional SIGTIERRAS del ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador a escala 25000 (MAGAP-SIGTIERRAS, 2016). El modelo digital de elevaciones (DEM) para la cuenca fue el DEM-SRTM de 30m, mientras que para el tramo fluvial se disponía de un DEM de 5m también del proyecto SIGTIERRAS. Registros con ocho puntos de control de inundación y un polígono del área inundada ajustado en terreno, estaban disponibles. La información hidrometeorológica corresponde a la red de la Universidad Ikiam, que mide lluvia (*Rainfall Gauge* en Figura 1) y caudal, a partir de

niveles y velocidades (*Streamflow Gauge* en Figura 1). Se separaron ocho eventos de tormentas registrados durante julio de 2018 y mayo de 2019. Además, se disponía del registro de precipitación del evento extremo que inundó la ciudad de Tena el 2 de septiembre de 2017.

2.3. MODELACION HIDROLÓGICA

Se utilizó el modelo semi-distribuido HEC-HMS (versión 4.2.1) para simular caudales en TENA y PANO con escala temporal de 1 minuto. Se seleccionó el método de curva número (CN) y el hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) como método de transformación lluvia-escorrentía (Cronshey & McCuen, 1986). El parámetro de CN se define en función de la cobertura del suelo, tipo de suelo y humedad antecedente. Los parámetros CN, tiempo de concentración (tc) y desfasaje de la cuenca (lag) fueron obtenidos de estudios previos en la cuenca. Según Mireia Fernandez Nualart & Bateman Pinzon, (2004) el CN de las cuencas es 90 y 87 para PANO and TENA respectivamente. Además, usando la ecuación Kirpich (Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2011) y aproximando el lag al 60% de tc se disponía de valores iniciales de tc y lag de 180 (190) y 108 (114) minutos para PANO (TENA) respectivamente. Se utilizó el módulo de calibración automática de HEC-HMS para calibrar CN y posteriormente se hizo la validación. El nivel de ajuste entre lo observado (en *Stream Gauge*, Figura 1) y simulado, se determinó con el coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS) de acuerdo a las especificaciones de Moriasi et al., (2007).

2.4. MODELACION HIDRÁULICA

Se utilizó el modelo Nays2DFlood (v3.0.0) para la modelación hidrodinámico (Shimizu et al., 2015). Este modelo es de código abierto y sirve para modelar el flujo bidimensional (2D) no permanente de aguas someras. Se usó una cuadrícula 1 km² con 10,000 celdas como dominio de modelación para evaluar el peligro de inundación en la ciudad de Tena (Figura 1d). Se definieron las condiciones de borde aguas arriba con los hidrogramas generados por modelo hidrológico; mientras que aguas abajo se especificó como flujo libre con nivel inicial de 0.5 m equivalente al caudal base. Inicialmente se estimó el coeficiente de Manning (n) a partir de ortofotos y visitas en terreno según las tablas de Chow, (1994). Luego se realizó un ajuste manual, basado en profundidades y velocidades observadas en la estación de aforo. Se empleó método interpolación restringida (CIP) para cálculos precisos. Se validó el desempeño de niveles y velocidades con las métricas NSE y PBIAS. Las áreas inundadas por el evento de septiembre de 2017 se evaluaron con el índice de ajuste F (Horritt & Bates, 2002). Este índice mide el grado de superposición de las áreas modeladas y simuladas y varía de 0 a 1 donde F=1 es una perfecta superposición y F=0 ninguna superposición. El índice F se obtiene dividiendo el área de intersección entre lo observado y simulado para el área que resulta de su unión espacial.

2.5. MAPA DE PELIGROSIDAD

Las características clave de una inundación y que definen su intensidad y peligro son: la velocidad de flujo (V) y los niveles (N). El mapa de intensidad de inundación del evento de 2017 se realizó usando la clasificación de intensidad propuesta por Vanessa Cançado et al., (2008) (Tabla 1).

Tabla 1. Intensidad de inundación como función de la velocidad y nivel del agua.

Inundación	Niveles (N) [m], Velocidad (V) [ms⁻¹]
Alta	$N > 1.5$ o $V > 1.5$
Media	$0.5 < N < 1.5$ o $0.5 < V < 1.5$
Baja	$0.1 < N < 0.5$ y $0.1 < V < 0.5$

3. RESULTADOS

3.1. DESEMPEÑO DEL MODELO HEC-HMS

Como se muestra en la Figura 2 y Tabla 2, la modelación de caudales de crecida con HEC-HMS indica resultados satisfactorios. De acuerdo con Moriasi et al., (2007), el evento de calibración (E1) indica un buen ajuste entre lo observado y simulado a partir de NSE (0.88) y PBIAS (16.6%). En cuanto a los eventos de validación, cuatro de siete eventos (E2, E3, E6, E8) tuvieron un desempeño aceptable ($0.76 \leq NSE \leq 0.95$; $-3.67\% \leq PBIAS \leq 10.46\%$). Sin embargo, debido a que la modelación es a escala de minuto, el evento E5 con NSE de 0.42, y PBIAS de 23.44% también se puede considerar aceptable según otros estudios (Van Liew et al., 2005).

En general el modelo fue capaz de recrear de manera confiable 6 de 8 eventos (75% de los casos). Las limitaciones observadas en la modelación de los eventos E4 y E7 se podría deber a la variabilidad espacial de precipitación, considerando que solo se registró el evento con una estación meteorológica. Sin embargo, bajo ciertas condiciones es factible la modelación hidrológica en la cuenca a partir de una sola estación. Estos resultados son prometedores dada la escasez de datos y la falta de sistemas de pronóstico local de crecidas.

Tabla 2. Observaciones y simulaciones hidrológicas del tiempo al máximo, caudales máximos y volumen de escorrentía en los 8 eventos (E1-E8).

Evento	Observado			Simulado		
	Hora del caudal máximo (hora)	Caudal máximo (m³/s)	Volumen de escorrentía (mm)	Hora del caudal máximo (hora)	Caudal máximo (m³/s)	Volumen de escorrentía (mm)
E1	09:24	714.20	100.66	09:47	641.10	83.96
E2	01:49	356.00	25.34	02:16	306.30	24.52
E3	23:09	234.80	16.92	22:42	263.70	17.54
E4	11:19	403.30	30.25	11:33	760.80	43.94
E5	00:09	435.60	24.1	01:36	178.10	18.45
E6	17:54	395.60	25.21	17:36	319.90	22.57
E7	14:24	589.80	33.76	14:53	178.10	14.63
E8	04:40	424.40	48.01	04:24	404.60	49.67

Por otro lado, el tiempo de diferencia entre el caudal máximo observado y simulado fue en promedio de 15 minutos. Los CN ajustados fueron de 84 en PANO y 81 en TENA. Los tiempos de respuesta o lag calibrados, resultaron en 125 y 130 minutos para PANO y TENA respectivamente. Los valores altos de CN (mayor coeficiente de escorrentía) así como los tiempos cortos en lag, pueden estar asociados a los patrones de precipitación intensa,

pendientes pronunciadas y suelos saturados en la cuenca. Además, es importante recordar que los bosques tienen una capacidad limitada para atenuar crecidas, sobre todo cuando el suelo está saturado (Bathurst et al., 2011; Hurtado-Pidal et al., 2022).

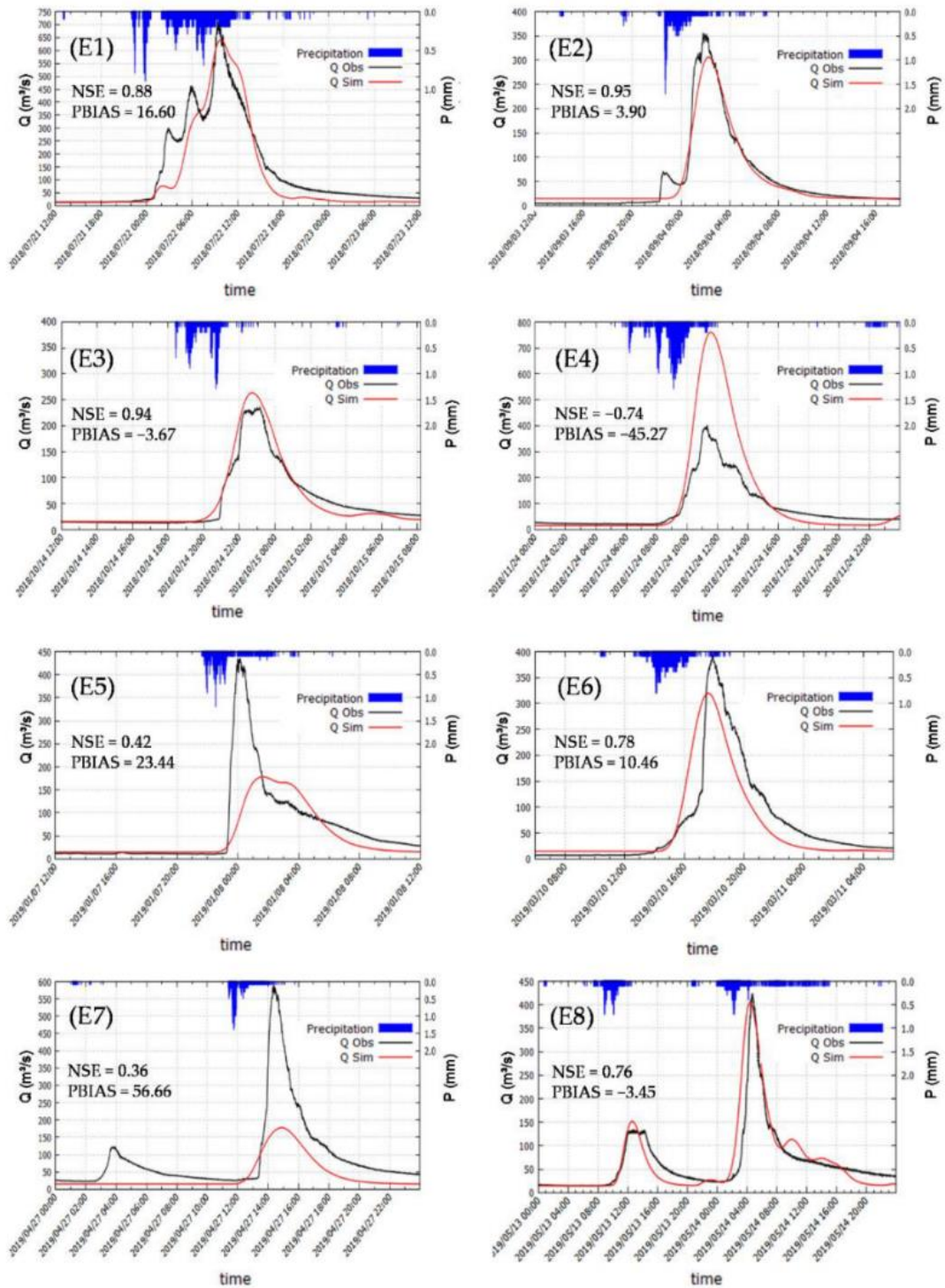


Figura 2. Hidrogramas observados (línea negra) y simulados (línea roja) con HEC-HMS para los eventos de calibración y validación. La línea azul en el eje x (superior) es la precipitación (Hurtado-Pidal et al., 2020)

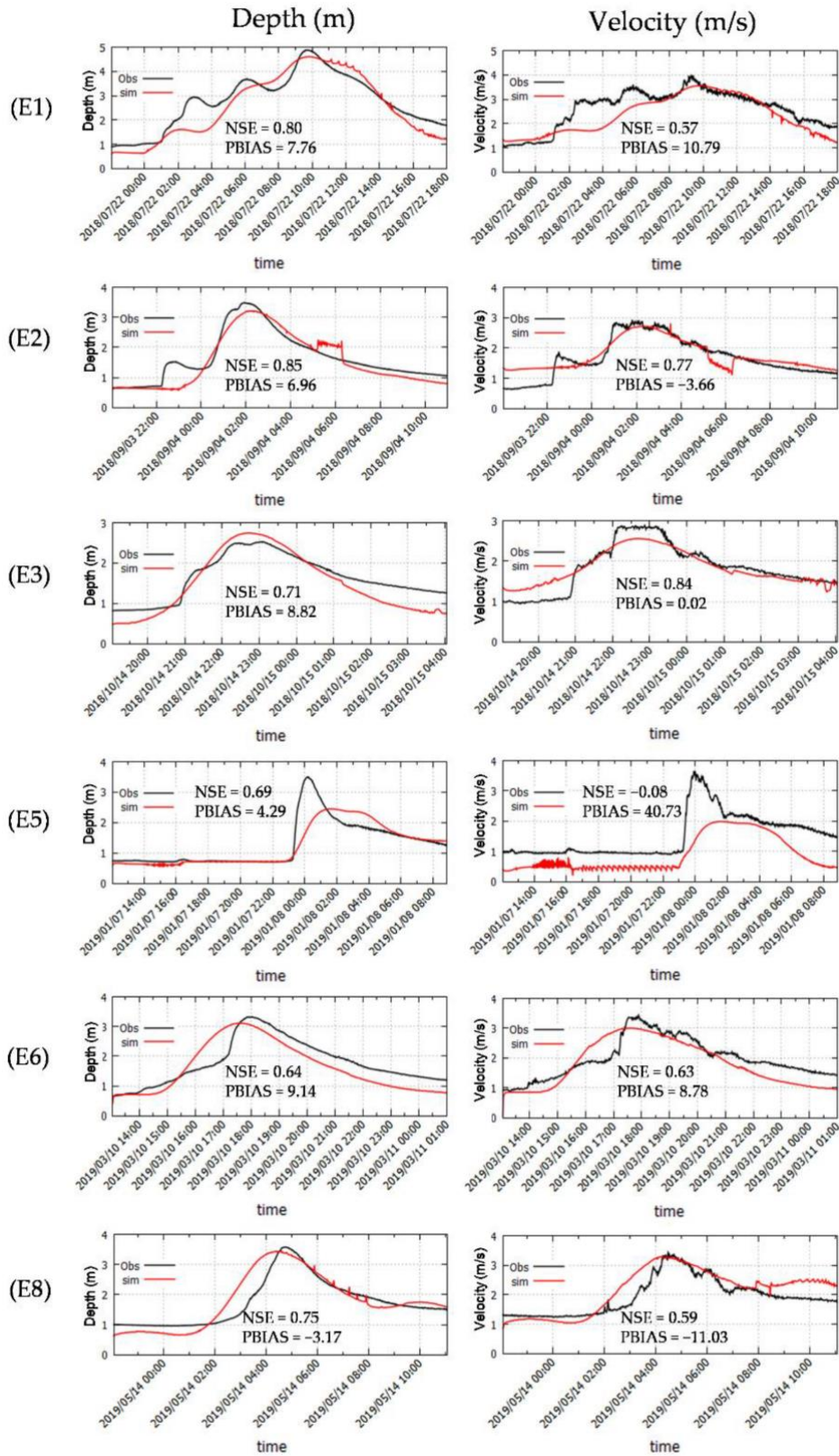


Figura 3. Niveles y velocidades observados (línea negra) y simulados (línea roja) con Nays2DFlood para los eventos de calibración y validación utilizados. Nótese que se usaron

solamente los eventos con aceptable desempeño en la modelación hidrológica. (Hurtado-Pidal et al., 2020)

3.1. DESEMPEÑO DEL MODELO NAYS2DFLOOD

La calibración y validación del coeficiente de Manning usado en el canal y en las llanuras de inundación, permitió encontrar un valor ajustado de 0.05. El modelo Nays2DFlood demostró resultados satisfactorios al simular niveles ($0.64 \leq NSE \leq 0.85$; $-3.17\% \leq PBIAS \leq 8.62\%$) durante los eventos de calibración y validación (E1, E2, E3, E5, E6, E8; Figura 3). En resumen, se obtuvo un rendimiento 'muy bueno' según las especificaciones de Moriasi et al., (2007).

Para la velocidad del flujo, el NSE ($0.57 \leq NSE \leq 0.84$) y el PBIAS ($-11.03\% \leq PBIAS \leq 10.79\%$) mostraron un ajuste razonable en cinco de los seis eventos evaluados (E1-E3, E6, E8; Figura 3). Sin embargo, el modelo no pudo replicar la velocidad del flujo durante el evento E5 (NSE = -0.08; PBIAS = 40.73%; Figura 3). Este error en la velocidad del flujo en E5 estaría relacionado a la baja precisión del modelo hidrológico al simular el caudal para este evento a partir de una sola estación meteorológica.

3.3. SIMULACION DE LA INUNDACION DE SEPTIEMBRE DE 2017

A partir de la simulación del evento de inundación de 2017 con el modelo HEC-HMS, se obtuvo un caudal máximo de 1967 m³/s, lo cual significa 5.1% menos que la estimación de Mireia Fernandez Nualart & Bateman Pinzon, (2004). El caudal máximo de la crecida llegó a las 23:40 h, y gran parte de llanuras se inundaron. Por otro lado, se encontró una buena concordancia entre las áreas inundadas simuladas y observadas (F = 0.8). Además, seis de ocho puntos control coinciden con las áreas de inundación simuladas, y el nivel de la huella de inundación observada (1.2 m) es similar al nivel simulado (1.23 m) en ese mismo lugar (Figura 4c).

La Figura 4d indica el mapa de intensidad de inundación, donde las áreas con intensidad alta y media cubren el 94 % del área total de análisis. Estas áreas representan un peligro para las personas porque dificultan las tareas de evacuación y rescate. A una profundidad de al menos 0.3 m y una velocidad de agua de 2 m/s, las personas y automóviles se vuelven inestables (Bocanegra et al., 2020). Por otro lado 1.5m de nivel de agua representa un factor de daño de 0.84 para construcciones residenciales de Sudamérica (Huizinga et al., 2017). Según reportes del gobierno, durante este evento de inundación una persona murió, mientras que 1312 personas y 324 residencias fueron afectadas (SGR, 2017).

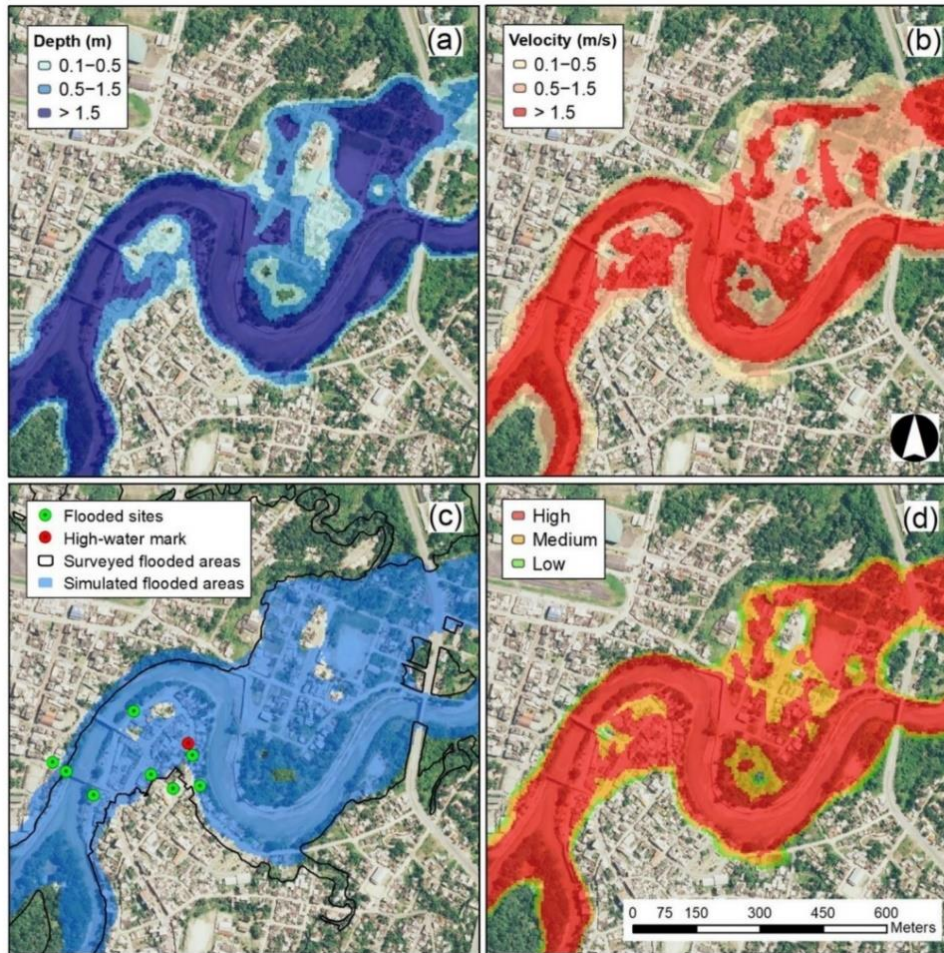


Figura 4. Evento de inundación reconstruido. a) Niveles; b) velocidades; c) área de inundación modelada y observada (línea negra), y puntos de control (puntos verdes) y marca con nivel de agua (punto rojo); d) mapa de intensidad de inundación según las categorías de la Tabla 2. (Hurtado-Pidal et al., 2020)

4. CONCLUSIONES

Este trabajo implementó un esquema de modelación acoplada para simular crecidas e inundaciones a partir de datos escasos. Además, se evaluó la capacidad de los modelos acoplados (HEC-HMS y Nays2DFlood) para simular la inundación del 2 septiembre de 2017 en la ciudad de Tena.

El enfoque demostró validez para calibrar y validar el esquema acoplado de modelos hidrológico e hidrodinámico, recreando eventos extremos de inundaciones. La simulación de caudales y niveles de agua fue satisfactoria en un 75% de los eventos evaluados. Esto sugiere que un solo pluviómetro puede representar adecuadamente, bajo ciertas condiciones, los patrones de precipitación en la zona de estudio. Se logró recrear de forma adecuada la inundación extrema del 2 de septiembre de 2017 en la ciudad de Tena.

El muestreo de eventos aislados y el levantamiento de datos en terreno, podría ayudar con la evaluación, monitoreo y pronóstico de inundaciones en países en desarrollo, mientras sistemas de monitoreo se fortalecen. Este esquema metodológico permite a los técnicos y tomadores de decisiones planificar medidas de adaptación y mitigación ante inundaciones a escala local.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Regional Amazónica Ikiam por la entrega de información hidrometeorológica, al Municipio de Tena por los datos sobre el polígono de inundación y al proyecto anillos ATE 220021 'climate change and the sociohydrology of floods' por auspiciar este trabajo.

REFERENCIAS

- Bates, P. D., & De Roo, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1–2), 54–77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X)
- Bathurst, J. C., Iroumé, A., Cisneros, F., Fallas, J., Iturraspe, R., Novillo, M. G., Urciuolo, A., Bièvre, B. de, Borges, V. G., Coello, C., Cisneros, P., Gayoso, J., Miranda, M., & Ramírez, M. (2011). Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 1: Field data analysis. *Journal of Hydrology*, 400(3–4), 281–291. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.11.044>
- 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 En Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bocanegra, R. A., Vallés-Morán, F. J., & Francés, F. (2020). Review and analysis of vehicle stability models during floods and proposal for future improvements. *Journal of Flood Risk Management*, 13(S1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12551>
- Boongaling, C. G. K., Faustino-Eslava, D. V., & Lansigan, F. P. (2018). Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. *Land Use Policy*, 72(August 2016), 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.042>
- Caçado, V., Brasil, L., Nascimento, N., & Guerra, A. (2008). Flood Risk Assessment in an urban area: Measuring hazard and vulnerability. *11th International Conference on Urban Drainage*, 1–10.
- Chow, V. (1994). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS* (J. Sandarriaga & A. Zuluaga (eds.); traducción). McGRAW-HILL.
- Correa, A., Windhorst, D., Crespo, P., Célleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2016). Continuous versus event-based sampling: how many samples are required for deriving general hydrological understanding on Ecuador's páramo region? *Hydrological Processes*, 30(22), 4059–4073. <https://doi.org/10.1002/hyp.10975>
- Cronshey, R., & McCuen, R. H. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division. <https://tamug-ir.tdl.org/handle/1969.3/24438>
- Fernandez Nualart, M., & Bateman Pinzon, A. (2004). *Recuperación paisajística y estudio*

de inundabilidad del sistema hídrico a su paso por Tena.

- Horritt, M. S. S., & Bates, P. D. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1–4), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00121-X)
- Huizinga, J., de Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions : Methodology and the Database with Guidelines. In *Joint Research Centre (JRC)*. <https://doi.org/10.2760/16510>
- Hurtado-Pidal, J., Acero Triana, J. S., Aguayo, M., Link, O., Valencia, B. G., Espitia-Sarmiento, E., & Conicelli, B. (2022). Is forest location more important than forest fragmentation for flood regulation? *Ecological Engineering*, 183, 106764. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2022.106764>
- Hurtado-Pidal, J., Acero Triana, J. S., Espitia-Sarmiento, E., & Jarrín-Pérez, F. (2020). Flood Hazard Assessment in Data-Scarce Watersheds Using Model Coupling, Event Sampling, and Survey Data. *Water*, 12(10), 2768. <https://doi.org/10.3390/w12102768>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 41). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jain, S. K., Mani, P., Jain, S. K., Prakash, P., Singh, V. P., Tullos, D., Kumar, S., Agarwal, S. P., & Dimri, A. P. (2018). A Brief review of flood forecasting techniques and their applications. *International Journal of River Basin Management*, 16(3), 329–344. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1411920>
- MAGAP-SIGTIERRAS. (2016). *Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional*. MAGAP (Ministerio de Agricultura y Ganadería). metadatos.sigtierras.gob.ec
- Mishra, B. K., Rafiei Emam, A., Masago, Y., Kumar, P., Regmi, R. K., & Fukushi, K. (2018). Assessment of future flood inundations under climate and land use change scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S1105–S1115. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12311>
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., Harmel, D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Borga, M., Vivoni, E. R., & Papadopoulos, A. (2011). Sensitivity of a mountain basin flash flood to initial wetness condition and rainfall variability. *Journal of Hydrology*, 402(3–4), 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.020>
- Perdigão, R. A. P., & Blöschl, G. (2014). Spatiotemporal flood sensitivity to annual precipitation: Evidence for landscape-climate coevolution. *Water Resources Research*, 50(7), 5492–5509. <https://doi.org/10.1002/2014WR015365>
- Reynolds, J. E., Halldin, S., Seibert, J., Xu, C. Y., & Grabs, T. (2019). Robustness of flood-model calibration using single and multiple events. *Hydrological Sciences Journal*, 6667. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1609682>
- SGR. (2017). *COE Cantonal toma resoluciones ante emergencia en Tena. Boletín de Prensa*. COE Cantonal Toma Resoluciones Ante Emergencia En Tena. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/coe-cantonal-toma-resoluciones-ante-emergencia-en-tena/>
- Shimizu, Y., Inoue, T., Suzuki, E., Kawamura, S., Iwasaki, T., Hamaki, M., Omura, K.,

- Takegawa, E., & Yoshida, T. (2015). *Nays2DFlood - Solver Manual* (pp. 1–51). River center of Hokkaido, Japan.
- Van Liew, M. W., Arnold, J. G., & Bosch, D. D. (2005). PROBLEMS AND POTENTIAL OF AUTOCALIBRATING A HYDROLOGIC MODEL. *Transactions of the ASAE*, 48(3), 1025–1040. <https://doi.org/10.13031/2013.18514>
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales (Estimation of the time of concentration and the lag time at San Luis creek basin, Manizales). *Dyna*, 165(165), 59.