DOI: https://doi.org/10.46296/yc.v10i19.1030

USO DEL ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN DEL RIESGO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE INUNDACIÓN URBANA AFECTADAS POR EL RÍO MANTA

USE OF HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC ANALYSIS AS A RISK MANAGEMENT TOOL FOR IDENTIFYING URBAN AREAS AFFECTED BY FLOODING FROM THE MANTA RIVER

Salvador-Zambrano César Andrés [1]; Reyes-Zambrano Jimmy Leandro [2]; Chavarría-Párraga Jesús Enrique [3]; Alarcón-Loor José Ramón [4]

[1] Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí. Ecuador. Correo: casalvadorz@pucesm.edu.ec. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0004-3132-1496

[2] Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí. Ecuador. Correo: jlreyesz@pucesm.edu.ec. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-0962-519X

[3] Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí. Ecuador. Correo: jechavarria@pucesm.edu.ec. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8868-394X.

[4] Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí. Ecuador. Correo: jralarcon@pucesm.edu.ec. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4766-6005

Resumen

Se evaluó la concordancia de CHIRPS y NASA POWER UTC con registros de la estación Eloy Alfaro y se cuantificó la sensibilidad de un dominio hidráulico urbano en Manta, Ecuador. Se analizaron 3653 valores diarios por producto (2016–2025) y 627 reportes instrumentales de precipitación acumulada en 24 h. La incertidumbre del contraste se estimó mediante 5000 remuestreos pareados por bloques anuales. Frente a la estación, los sesgos acumulados fueron −50,10 % para CHIRPS y +44,43 % para NASA POWER UTC, con coeficientes de concordancia de Lin de 0,175 y 0,340, respectivamente. El dominio de 3,07 km² no intersectó los ejes de OpenStreetMap identificados como río Manta y coincidió con 193,91 m de ejes del Burro. Con igual lámina de lluvia y volumen de entrada, las tormentas de 2, 4 y 8 h produjeron picos de entrada de 189,42, 131,21 y 75,19 m³/s y superficies con profundidad máxima ≥ 0,10 m de 78,90, 66,16 y 55,61 ha. En un cuarto caso, variar la pendiente de energía en la salida del escenario de 4 h añadió 0,16 ha. Los resultados permiten evaluar la elección del insumo pluviométrico y la sensibilidad a la duración de la tormenta. La cobertura del dominio y la falta de observaciones hidráulicas restringen el uso de los mapas a comparaciones entre escenarios simulados.

Palabras claves: precipitación; concordancia; inundación urbana; HEC-RAS; sensibilidad hidráulica.

Abstract

This study evaluated agreement between CHIRPS and NASA POWER UTC and rainfall reports from the Eloy Alfaro station and quantified hydraulic sensitivity in an urban model domain in Manta, Ecuador. The analysis used 3,653 daily estimates per product (2016–2025) and 627 instrumental reports of 24-hour precipitation. Uncertainty was estimated from 5,000 paired annual-block bootstrap resamples. Relative to the station, cumulative biases were −50.10% for CHIRPS and +44.43% for NASA POWER UTC, with Lin concordance coefficients of 0.175 and 0.340, respectively. The 3.07 km² domain had no overlap with OpenStreetMap centerlines labeled Manta River and intersected 193.91 m of Burro centerlines. For equal rainfall depth and inflow volume, 2-, 4-, and 8-hour storms yielded peak inflows of 189.42, 131.21, and 75.19 m³/s and areas with maximum depth ≥ 0.10 m of 78.90, 66.16, and 55.61 ha. In a fourth run, changing the downstream energy slope of the 4-hour case added 0.16 ha. The results inform rainfall input

Información del manuscrito:
Fecha de recepción: 06 de agosto de 2026.
Fecha de aceptación: 15 de octubre de 2026.
Fecha de publicación: 16 de noviembre de 2026.

selection and quantify sensitivity to storm duration. Domain coverage and the lack of hydraulic observations limit the maps to comparisons among simulated scenarios.

Keywords: precipitation; agreement; urban flooding; HEC-RAS; hydraulic sensitivity.

1. Introducción

La identificación de zonas de inundación urbana depende de la lluvia utilizada, la representación del terreno y las condiciones hidráulicas. Las revisiones de Teng et al. (2017) y Mignot y Dewals (2022) muestran que estas decisiones condicionan las salidas del modelo. Para la gestión del riesgo, es necesario distinguir extensión calculada, exposición de elementos urbanos y efectos observados, de acuerdo con el Marco de Sendai y su terminología (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2015, 2017).

En Manta, el Plan Maestro Hidrosanitario sitúa la confluencia Manta–Burro en Miraflores. El reporte oficial del 11 de marzo de 2025 documentó desbordamientos en sectores de Tarqui (Municipio de San Pablo de Manta, 2010; Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos [SNGR], 2025). En Ecuador, los estudios de Orosco-Tacuri et al. (2024) y Tenesaca-Saca et al. (2024) muestran cómo la modelación de lluvia–escorrentía y la propagación hidráulica permiten identificar sectores susceptibles en quebradas urbanas. En una cuenca costera, Reyes et al. (2026) examinaron la respuesta a incrementos de lluvia y distinguieron la susceptibilidad geoespacial de la inundación estimada con un modelo hidráulico. Esa distinción es pertinente en Manta, donde la utilidad de las manchas depende de qué cauces y sectores quedan incluidos en el dominio.

CHIRPS integra estimaciones satelitales y observaciones de estaciones (Funk et al., 2015). NASA POWER distribuye precipitación corregida derivada del reanálisis MERRA-2 (Gelaro et al., 2017). El desempeño de estos productos depende de la escala y del contexto geográfico (Beck et al., 2017; Sun et al., 2018). Los contrastes instrumentales realizados en Ecuador (Huber Magoffin et al., 2023; Arechúa-Mazón et al., 2025) y la evaluación de insumos y redes de drenaje de Castro et al. (2026) respaldan una comprobación local

antes de emplear estimaciones de lluvia en modelos hidrológicos.

El estudio tuvo tres objetivos. Primero, contrastar CHIRPS y NASA POWER UTC con reportes de la estación Eloy Alfaro durante 2016–2025. Segundo, comprobar qué ejes fluviales quedan representados en el dominio hidráulico disponible. Tercero, medir cómo cambian el caudal de entrada, la extensión con agua y la exposición cartográfica al variar la duración de la tormenta o la pendiente de energía en la salida. El contraste pluviométrico y el experimento hidráulico se plantearon por separado. Las dos series diarias se compararon con la estación, mientras las simulaciones emplearon una lámina común fijada para el experimento.

2. Metodología

Datos y selección de registros

Se analizaron 3653 fechas por producto, del 1 de enero de 2016 al 31 de diciembre de 2025. CHIRPS se consultó en ClimateSERV, datatype 0, como promedio del rectángulo −80,690 a −80,680° de longitud y −0,970 a −0,960° de latitud. NASA POWER se extrajo para PRECTOTCORR en −80,685°, −0,965°, community AG y día UTC. La descarga del 14 de octubre de 2026 confirmó los 3653 valores CHIRPS archivados. Se verificaron calendario, duplicados y validez numérica (Funk et al., 2015; NASA POWER, 2026).

La referencia fue la estación Eloy Alfaro 84117099999 del conjunto NOAA GSOD, ubicada en −0,950°, −80,6833333°, a 1,678 km del punto de referencia. Se conservaron los valores PRCP utilizables con bandera G, que identifica un único reporte de acumulación de 24 h, y se convirtieron las pulgadas a milímetros con el factor 25,4. La muestra incluyó 627 fechas entre el 2 de enero de 2016 y el 24 de junio de 2025, de las cuales 277 registraron 0 mm. Las fechas sin reporte válido se excluyeron del cálculo (National Centers for Environmental Information [NCEI], 2026).

Índices y contraste pluviométrico

Se calcularon totales anuales y mensuales, proporción de enero a abril, días húmedos ≥1 mm, Rx1day, Rx5day y R20mm. Rx5day utiliza

cinco días consecutivos completos dentro del año; R20mm cuenta días ≥20 mm (Zhang et al., 2011). La concentración se expresó como el menor número de días que acumula la mitad del total del periodo. Estos indicadores se calcularon por producto sin imputación ni ajuste de sesgo.

Sobre las 627 fechas se calcularon MAE, RMSE, PBIAS, correlación de Pearson y concordancia de Lin. PBIAS conserva el signo producto menos observación; Lin evalúa asociación y proximidad a la igualdad (Lin, 1989). MAE y RMSE se reportaron conjuntamente por su distinta ponderación de errores (Willmott & Matsuura, 2005; Chai & Draxler, 2014), según el uso evaluado (Moriasi et al., 2015). La ecuación 1 define MAE y PBIAS, con P producto, O observación y n pares.

$$MAE = \frac{\Sigma |P_i - O_i|}{n}; \quad PBIAS = 100 \frac{\Sigma (P_i - O_i)}{\Sigma O_i} \quad (1)$$

Se mantuvo la fecha de reporte como referencia y se probaron desfases del producto de ±1 día para explorar diferencias en la hora de acumulación. Se generaron 5000 réplicas pareadas a partir de diez bloques anuales con reemplazo, conservando todos los pares de cada año (semilla 20261014). Se calcularon intervalos percentiles del 95 % para los indicadores por producto y para la diferencia de RMSE entre NASA POWER UTC y CHIRPS, usando los mismos bloques en ambos productos (Efron & Tibshirani, 1993; Künsch, 1989).

Dominio y experimento numérico

El perímetro se extrajo de Simulacionhec.g01.hdf y se evaluó en WGS 84 / UTM 17S, EPSG:32717. Se calcularon área poligonal e intersecciones vectoriales con entidades OSM denominadas Manta y Burro, recuperadas en la ventana −80,730 a −80,635° y −1,010 a −0,935°. Se mantuvo la fecha del extracto: 14 de octubre de 2026, 04:05:25 UTC (OpenStreetMap contributors, 2026). Los nombres proceden del extracto OSM.

Las cuatro ejecuciones de HEC-RAS 6.6 usaron una lámina de lluvia de 120,404880 mm, un número de curva (CN) de 85, un área aportante de 12,710904 km² y un tiempo de retardo de 46,18 min. D2, D4 y D8 representaron tormentas de 2, 4 y 8 h con una pendiente de energía de

0,030 en la condición de profundidad normal. S005 mantuvo el hidrograma de D4 y redujo la pendiente a 0,005. La lámina y el CN se fijaron como parámetros experimentales, sin asignar un periodo de retorno ni estimar la impermeabilización local. La lluvia se distribuyó con pesos triangulares simétricos en intervalos de 5 min. Se aplicó SCS-CN con S = 25400/CN − 254 y abstracción inicial de 0,2S. La escorrentía efectiva siguió la ecuación 2 y fue cero para P ≤ 0,2S (Soil Conservation Service, 1986).

$$E = \frac{(P - 0{,}2S)^2}{P + 0{,}8S} \quad para\ P > 0{,}2S \quad (2)$$

Los incrementos efectivos se convolucionaron en Python con un hidrograma triangular de tiempo al pico 48,68 min y base 2,67 veces ese tiempo, normalizado por volumen. HEC-RAS utilizó 3721 celdas de tamaño nominal 30 m, terreno de 4 m, Manning n = 0,06, onda difusiva, un ingreso agregado al sur y profundidad normal al norte. El paso fue 1 s, durante 12 h, con 721 estados guardados por caso. Se comprobaron terminación, código de salida cero, duración y balance volumétrico (U.S. Army Corps of Engineers [USACE], 2024). Las fechas internas son un reloj del proyecto; las ejecuciones corresponden a octubre de 2026.

Cartografía y exposición

La profundidad máxima se obtuvo restando la elevación del terreno de la cota máxima de agua y se rasterizó a 4 m. Se excluyeron los valores NoData, los píxeles fuera del dominio y las celdas cuya cota de agua no superó el mínimo topográfico local en más de 0,001 m. Se aplicó el umbral de profundidad máxima ≥ 0,10 m, incluido el cauce. A partir de esas máscaras se calcularon la unión, la intersección y el número de escenarios por píxel. Cada huella de edificio OSM se contó una sola vez por escenario cuando intersectó la máscara. Se excluyeron los objetos etiquetados como building=no y las relaciones multipolígono. La longitud de vías motorizadas se estimó mediante puntos medios de segmentos de hasta 2 m. Los mapas conservaron extensión y escala comunes para comparar los escenarios.

3. Resultados

La Figura 1 muestra el dominio de 3,072351 km² y su relación con las fuentes de precipitación y los cauces cartografiados. El perímetro no intersectó los ejes denominados Manta en el extracto de OpenStreetMap y comprendió 193,91 m de los ejes denominados Burro. Las simulaciones se interpretan dentro de ese perímetro.

Figura 1. *Ubicación de las fuentes de precipitación y del dominio hidráulico*



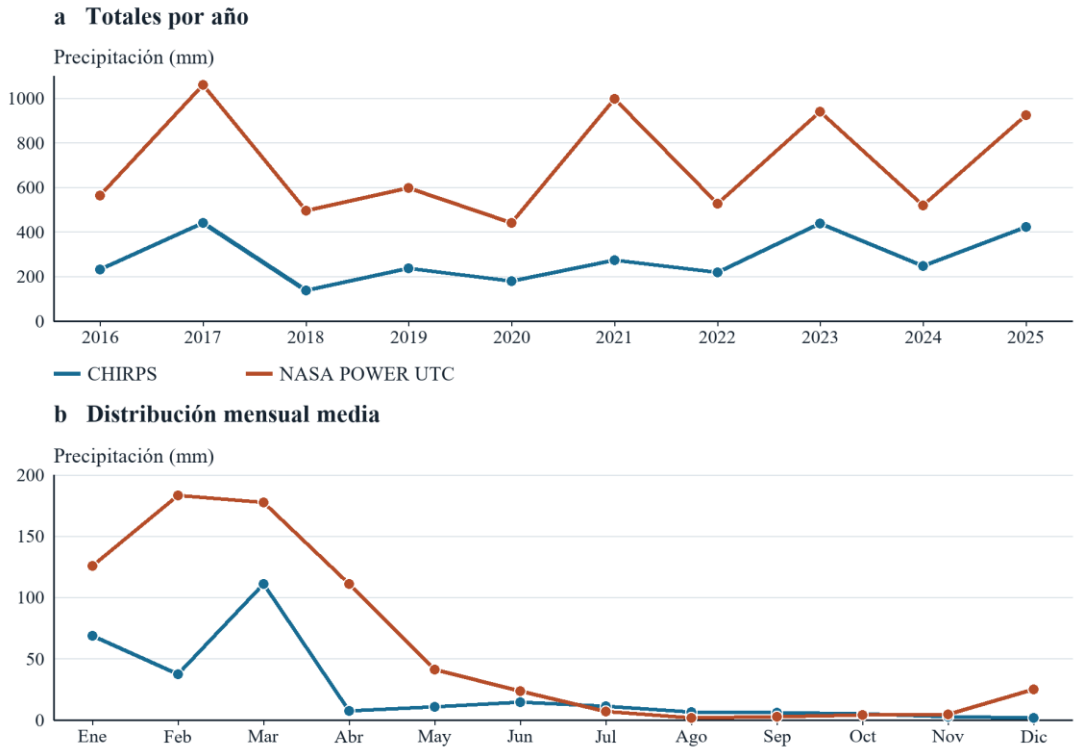
Nota. WGS 84 / UTM 17S (EPSG:32717). El cuadrado indica el punto de consulta de NASA POWER UTC y el centro del rectángulo de CHIRPS. La base satelital Esri World Imagery se consultó el 13 de octubre de 2026. Ejes fluviales de OpenStreetMap, © OpenStreetMap contributors, ODbL.

Distribución de la precipitación

La precipitación media anual estimada por NASA POWER UTC fue 2,50 veces la de CHIRPS (705,96 frente a 282,58 mm). Entre enero y abril se acumuló el 84,52 % y el 79,30 % del total de cada producto, respectivamente. La mitad de la lluvia del periodo se concentró en 186 días para NASA POWER UTC y en 79 para CHIRPS. Los

máximos anuales de cinco días (Rx5day) variaron entre 47,56 y 154,49 mm para NASA POWER UTC y entre 24,61 y 101,00 mm para CHIRPS. NASA POWER UTC registró 60 días con al menos 20 mm, frente a 16 en CHIRPS. El máximo diario del periodo fue de 60,65 mm en NASA POWER UTC y de 101,00 mm en CHIRPS. Los 120 pares de totales mensuales tuvieron una correlación de Pearson de 0,731 y una concordancia de Lin de 0,488. La Figura 2 muestra la variación anual y la distribución estacional.

Figura 2. *Totales anuales y precipitación mensual media durante 2016 a 2025*



Nota. El panel a presenta los totales anuales. El panel b muestra el promedio de los totales de cada mes durante el periodo. Fuentes: CHIRPS y NASA POWER UTC, con 3653 fechas por producto.

Concordancia instrumental

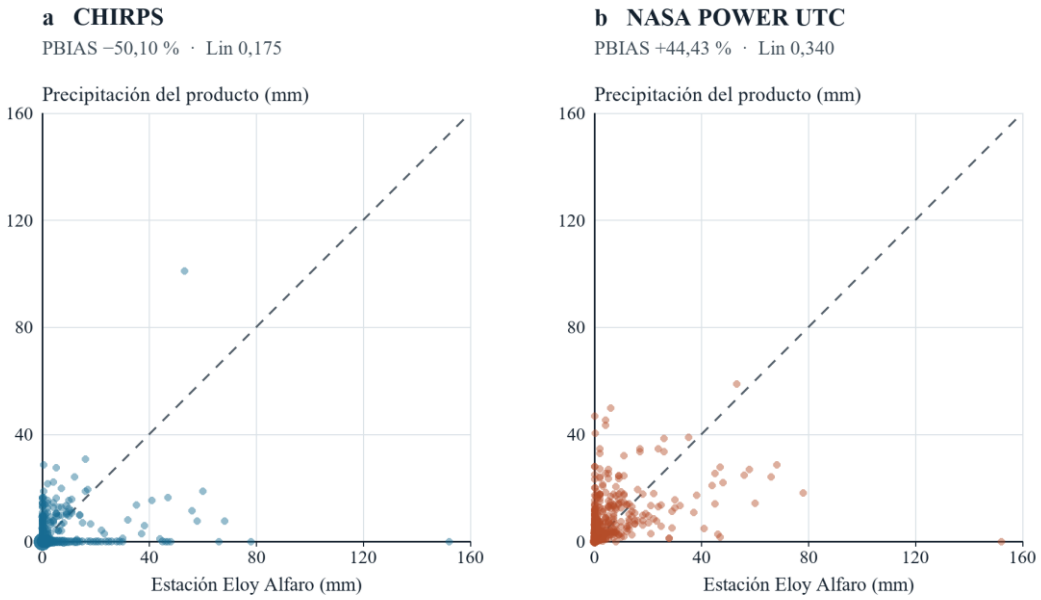
CHIRPS tuvo un menor error absoluto medio y NASA POWER UTC una menor raíz del error cuadrático medio (Tabla 1). Sus sesgos acumulados tuvieron signos opuestos. Los desfases de ±1 día no mejoraron la concordancia respecto del emparejamiento por fecha de reporte. La Figura 3 muestra la dispersión con respecto a la línea de igualdad.

Tabla 1. *Contraste sobre 627 reportes instrumentales de 24 horas*

Indicador	CHIRPS	NASA POWER UTC
MAE (mm)	4,962	5,986
RMSE (mm)	12,037	11,577
PBIAS (%)	−50,10	+44,43
Pearson (r)	0,216	0,368
Lin (ρc)	0,175	0,340

Nota. Los indicadores corresponden a las fechas seleccionadas. PBIAS positivo indica sobreestimación acumulada respecto de la estación.

Figura 3. *Contraste de cada producto con la estación Eloy Alfaro*



Nota. La línea discontinua indica igualdad. El tamaño y la intensidad del marcador aumentan cuando varias fechas comparten las mismas coordenadas. Fuente instrumental: NOAA GSOD, reportes con bandera G.

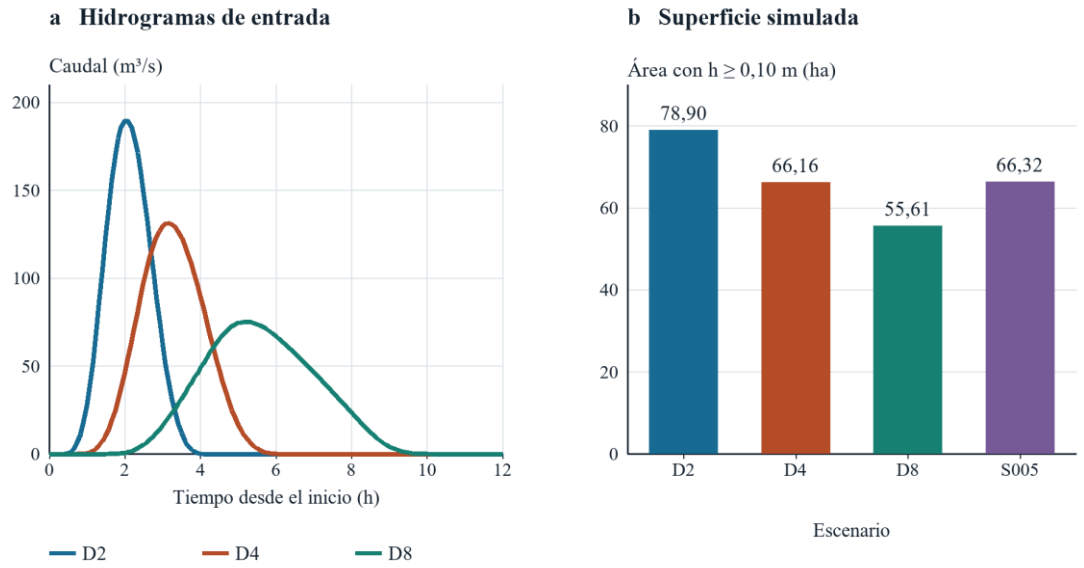
Los intervalos percentiles del 95 % para RMSE fueron 9,93 a 14,72 mm para CHIRPS y 9,26 a 14,22 mm para NASA POWER UTC. Para PBIAS, fueron −63,88 % a −39,89 % y +23,58 % a +67,38 %, respectivamente. Los intervalos de PBIAS mantuvieron signos opuestos en la muestra remuestreada. La diferencia pareada de RMSE (NASA POWER UTC menos CHIRPS) fue de −0,46 mm, con un intervalo del 95 % de −1,35 a +0,27 mm. El intervalo abarca cero y admite diferencias en ambas direcciones.

Sensibilidad hidráulica

Con un volumen común de entrada de 1 010 187,27 m³, acortar la tormenta de 4 a 2 h aumentó el caudal pico de entrada en 44,36 % y la superficie con profundidad

máxima ≥ 0,10 m en 19,25 %. Al extenderla a 8 h, ambas magnitudes disminuyeron en 42,69 % y 15,94 %, respectivamente (Figura 4 y Tabla 2). S005 conservó el hidrograma de D4. Al reducir la pendiente de energía en la salida, mantuvo toda la superficie de D4 por encima del umbral y agregó 0,1584 ha.

Figura 4. *Hidrogramas de entrada y superficie simulada por escenario*



Nota. D2, D4 y D8 conservan la lámina de lluvia y el volumen de entrada. El hidrograma de S005 coincide con el de D4. La superficie incluye cauces.

Tabla 2. *Resultados del experimento hidráulico controlado*

Caso	Duración (h)	Pendiente (m/m)	Pico de entrada (m³/s)	Área (ha)	P95 (m)	Error de balance (%)
D2	2	0,030	189,42	78,8960	3,276	0,004971
D4	4	0,030	131,21	66,1616	3,059	0,003678
D8	8	0,030	75,19	55,6128	2,688	0,003306
S005	4	0,005	131,21	66,3200	3,058	0,003672

Nota. P95 corresponde a los píxeles con h ≥ 0,10 m. HEC-RAS informa el error de balance.

Coincidencia y exposición cartográfica

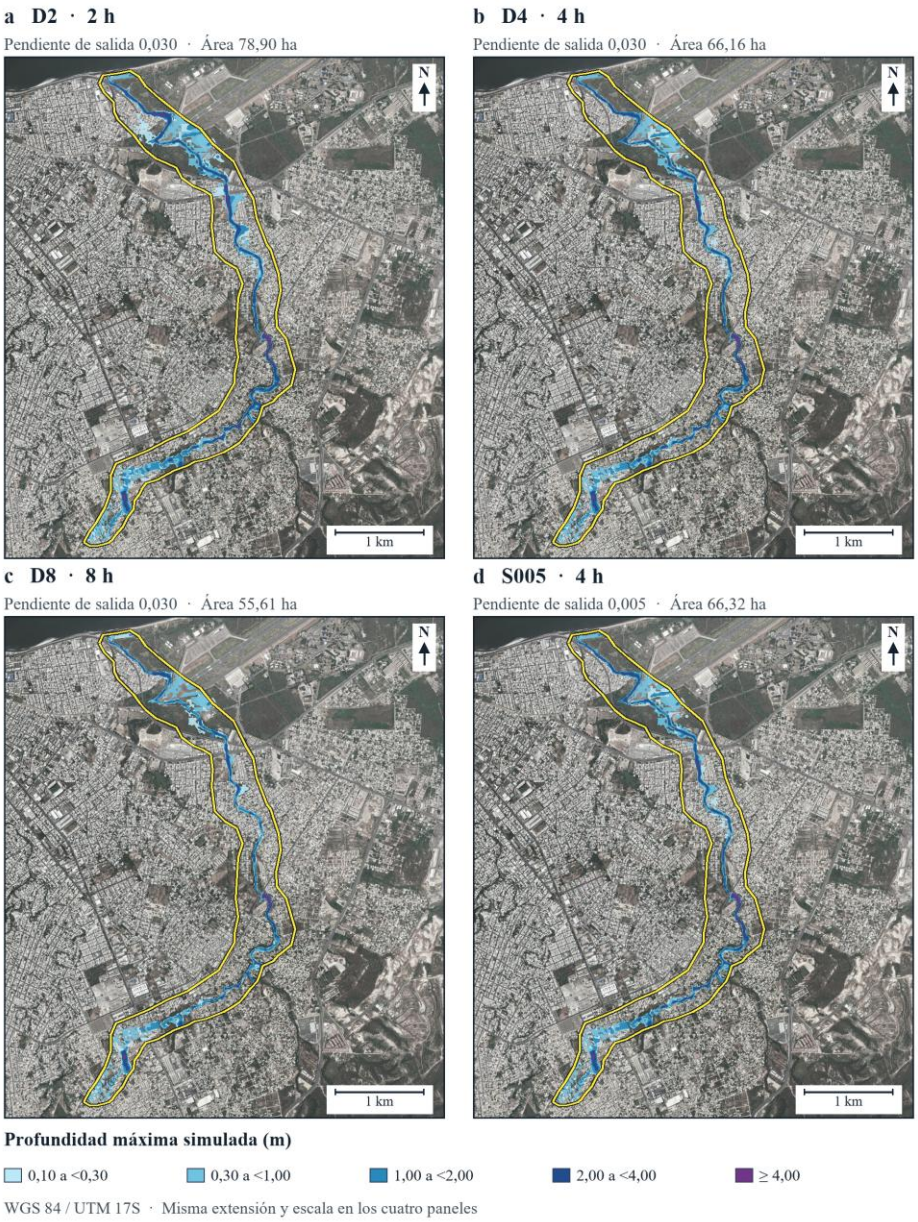
La superficie que superó el umbral en los cuatro escenarios fue de 55,61 ha, el 70,41 % de la unión de 78,99 ha. A su vez, 12,76 ha superaron el umbral en un solo escenario (figuras 5 y 6). Frente a D4, D2 intersectó 88 huellas adicionales en el conteo total y 3,021 km más de vías (Tabla 3). Los cambios son diferencias entre escenarios a partir de un mismo inventario cartográfico.

Tabla 3. *Intersección de objetos cartográficos con agua simulada*

Escenario	Huellas OSM (n)	Vías con agua (km)	Tramos OSM (n)
D2	475	11,246	192
D4	387	8,225	158
D8	321	6,288	135
S005	387	8,225	158

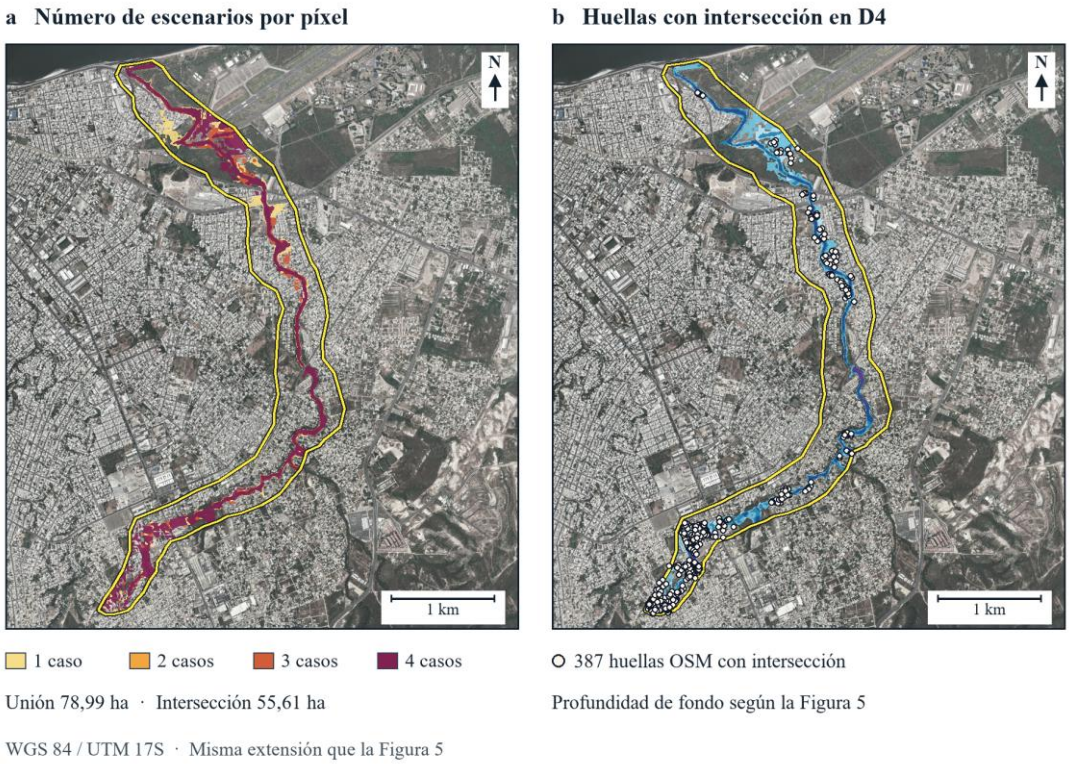
Nota. El inventario comprende 2531 huellas de edificios y 58,460 km de vías motorizadas. Los tramos son objetos lineales de OpenStreetMap que intersectan la máscara simulada. Las cifras describen exposición geométrica.

Figura 5. *Mosaico de profundidad máxima en las cuatro simulaciones*



Nota. Las clases representan profundidad máxima simulada, con umbral h ≥ 0,10 m. El contorno amarillo delimita el dominio. Base satelital Esri World Imagery.

Figura 6. *Coincidencia de manchas y exposición cartográfica en D4*



Nota. El panel a muestra cuántos escenarios superan el umbral en cada píxel. En el panel b, cada punto representa una huella OSM que intersecta la máscara de D4. Los puntos se ubicaron en el promedio de las coordenadas de los vértices de cada huella. Base Esri World Imagery y datos © OpenStreetMap contributors, ODbL.

4. Discusión

Los dos productos sitúan la mayor parte de la lluvia entre enero y abril, pero difieren en la acumulación y en la concentración de la lluvia en pocos días. Este resultado concuerda con la necesidad de contrastar cada producto a la escala de uso (Sun et al., 2018; Huber Magoffin et al., 2023; Arechúa-Mazón et al., 2025). Para Manta, el contraste abarca una estación y reportes de 24 h con cobertura desigual entre años. También compara un dato puntual de estación con estimaciones que representan superficies y pueden tener ventanas de acumulación distintas. Por ello, los sesgos estimados corresponden a la muestra pareada y su uso para corregir lluvias de diseño requeriría evidencia adicional.

La comparación a volumen fijo permite atribuir las diferencias entre D2, D4 y D8 a la duración adoptada en el experimento. Al concentrar la lluvia en menos tiempo, D2 generó

un pico de entrada mayor y una superficie más extensa por encima del umbral. El cambio de pendiente entre D4 y S005 tuvo un efecto pequeño sobre la superficie total en las condiciones ensayadas. Su resultado se limita a dos valores de pendiente bajo profundidad normal. Para evaluar el efecto costero habría que ensayar una condición de nivel aguas abajo con datos de marea. El estudio de Reyes et al. (2026) y la evaluación de erosividad en Manabí de Tamayo-Marín et al. (2025) aportan, respectivamente, un marco para estudiar amenazas compuestas y evidencia regional sobre erosividad de la lluvia. Aquí se mantuvo fija la geometría del cauce durante las simulaciones.

La superficie común identifica sectores que superaron 0,10 m bajo las cuatro configuraciones ensayadas y puede orientar verificaciones de campo. Los recuentos de huellas y longitudes viales expresan exposición geométrica al agua simulada. Para estimar daños se necesitarían datos sobre vulnerabilidad y características de los elementos expuestos. Además, la malla nominal de 30 m y el posprocesamiento a 4 m cumplen funciones distintas. El ráster fino permite representar el resultado sobre el terreno, mientras la capacidad de resolver el flujo entre obstáculos depende de la malla y de cómo se incorporaron las estructuras urbanas (Fewtrell et al., 2008; Schubert & Sanders, 2012; Iliadis et al., 2024).

El error de balance volumétrico inferior a 0,005 % comprueba la conservación de volumen en las cuatro ejecuciones. La capacidad predictiva requeriría comparar caudales, niveles o extensiones simuladas con observaciones de una crecida (Horritt & Bates, 2002). Antes de aplicar este enfoque a la zonificación del río Manta, habría que comprobar la red fluvial con cartografía oficial y levantamientos, delimitar un dominio que incluya el tramo de interés y los aportes de la confluencia, y evaluar la sensibilidad a la rugosidad y a la resolución de la malla. El modelo disponible mantuvo Manning uniforme, usó un solo aporte agregado y careció de una prueba de convergencia de malla.

5. Conclusiones

CHIRPS y NASA POWER UTC mostraron sesgos de signos opuestos (−50,10 % y +44,43 %) y concordancias de Lin bajas (0,175 y 0,340) en las 627 fechas comparadas. La marcada diferencia entre las magnitudes estimadas justifica evaluar cada producto con observaciones locales antes de emplearlo para calcular escorrentía.

La duración de la tormenta, con igual volumen de entrada, cambió la superficie simulada por encima de 0,10 m de 55,61 ha en D8 a 78,90 ha en D2. El cambio de pendiente de energía en S005 añadió 0,16 ha respecto de D4. Las 55,61 ha comunes a los cuatro escenarios identifican sectores que permanecen sobre el umbral en el conjunto de casos analizado.

El estudio delimitó un dominio de 3,07 km² que no intersecta los ejes OSM del río Manta y comprende 193,91 m de ejes del Burro. Los mapas localizan intersecciones con infraestructura en el dominio evaluado. Una evaluación predictiva del río Manta requiere cubrir el tramo de interés y contrastar el modelo con observaciones de crecida.

Bibliografía

Arechúa-Mazón, P., Cisneros-Vaca, C., Calahorrano-González, J., & Manzano-Cepeda, M. (2025). Assessment of satellite precipitation products in an Andean catchment: Ambato River Basin, Ecuador. Hydrology, 12(9), Artículo 225. https://doi.org/10.3390/hydrology12090225

Beck, H. E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, A. I. J. M., Weedon, G. P., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G. J., & Wood, E. F. (2017). Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. Hydrology and Earth System Sciences, 21(12), 6201–6217. https://doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017

Castro, F. A., Reyes, J. L., Palma, W. P., Mejía, L. M., & Macías, I. A. (2026). Validation-led hydroclimatic framework for a mountain water-transfer basin. En V. Villa, M. Domaneschi, A. Singh, & S. Yazdani (Eds.), Proceedings of International Structural Engineering and Construction (vol. 13, núm. 2, art. HAH-07). ISEC Press. https://doi.org/10.14455/ISEC.2026.13(2).HAH-07

Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, 7(3), 1247–1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). An introduction to the bootstrap. Chapman & Hall. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4541-9

Fewtrell, T. J., Bates, P. D., Horritt, M. S., & Hunter, N. M. (2008). Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. Hydrological Processes, 22, 5107–5118. https://doi.org/10.1002/hyp.7148

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2, Artículo 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., … Zhao, B. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). Journal of Climate, 30(14), 5419–5454. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1

Horritt, M. S., & Bates, P. 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

Huber Magoffin, R., Hales, R. C., Erazo, B., Nelson, E. J., Larco, K., & Miskin, T. J. (2023). Evaluating the performance of satellite derived temperature and precipitation datasets in Ecuador. Remote Sensing, 15(24), Artículo 5713. https://doi.org/10.3390/rs15245713

Iliadis, C., Glenis, V., & Kilsby, C. (2024). Representing buildings and urban features in hydrodynamic flood models. Journal of Flood Risk Management, 17(1), Artículo e12950.

https://doi.org/10.1111/jfr3.12950

Künsch, H. R. (1989). The jackknife and the bootstrap for general stationary observations. The Annals of Statistics, 17(3), 1217–1241. https://doi.org/10.1214/aos/1176347265

Lin, L. I.-K. (1989). A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. Biometrics, 45(1), 255–268. https://doi.org/10.2307/2532051

Mignot, E., & Dewals, B. (2022). Hydraulic modelling of inland urban flooding: Recent advances. Journal of Hydrology, 609, Artículo 127763. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127763

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. Transactions of the ASABE, 58(6), 1763–1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715

Municipio de San Pablo de Manta. (2010). Estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental del Plan Maestro Hidrosanitario para Manta. https://documents1.worldbank.org/curated/en/601231468249012119/pdf/E4236v20Ecuador00140201300Box377343B.pdf

NASA POWER. (2026). Precipitación diaria PRECTOTCORR en −0,965°, −80,685° durante 2016–2025 [Extracto de datos UTC descargado el 14 de octubre de 2026]. https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/daily/point?parameters=PRECTOTCORR&community=AG&longitude=-80.685&latitude=-0.965&start=20160101&end=20251231&format=JSON&time-standard=UTC

National Centers for Environmental Information. (2026). Global Summary of the Day de la estación 84117099999 durante 2016–2025 [Archivos anuales descargados el 14 de octubre de 2026]. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/access/

OpenStreetMap contributors. (2026). Cauces, edificaciones y red vial de Manta [Extracto de datos; base del 14 de octubre de 2026 a las 04:05:25 UTC]. https://www.openstreetmap.org/copyright

Orosco-Tacuri, M. K., Reyes-Zambrano, J. L., Chavarría-Párraga, J. E., & Alarcón-Loor, J. R. (2024). Modelación

hidrológica e hidráulica de la quebrada El Tejado para la análisis de zonas de inundación en la ciudad de Quito en 2023. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación, 7(14), 300–322. https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0219

Reyes, J. L., Castro, F. A., Palma, W. P., Mejía, L. M., & Macías, I. A. (2026). Geospatial rainfall-stress testing of compound hydro-sedimentary hazards in a coastal basin. En V. Villa, M. Domaneschi, A. Singh, & S. Yazdani (Eds.), Proceedings of International Structural Engineering and Construction (vol. 13, núm. 2, art. HAH-06). ISEC Press. https://doi.org/10.14455/ISEC.2026.13(2).HAH-06

Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. Advances in Water Resources, 41, 49–64. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.012

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2025, 11 de marzo). SitRep No. 56: Lluvias del 1 de enero al 11 de marzo de 2025. https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2025/03/SitRep-No-56-Lluvias-01012025-al-11032025-170000.pdf

Soil Conservation Service. (1986). Urban hydrology for small watersheds (2.ª ed., Technical Release 55). U.S. Department of Agriculture. https://www.govinfo.gov/app/details/CZIC-gb980-u73-1986

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K.-L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. Reviews of Geophysics, 56(1), 79–107. https://doi.org/10.1002/2017RG000574

Tamayo-Marín, A. A., Reyes-Zambrano, J. L., & Chavarría-Párraga, J. E. (2025). Análisis retrospectivo de la erosividad de la lluvia en los últimos años: aplicación de un modelo espacial en la provincia de Manabí. MQRInvestigar, 9(2), e449. https://doi.org/10.56048/MQR20225.9.2.2025.e449

Tenesaca-Saca, M. E., Reyes-Zambrano, J. L., Vallejo-Vizhuete, D. P., & Chavarría-Párraga, J. E. (2024). Modelación hidrológica e hidráulica para la identificación de zonas de inundación en la quebrada Las Abras, Riobamba. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e

Investigación, 7(14), 323–343. https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0220

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. Environmental Modelling & Software, 90, 201–216. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030. https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2017). Sendai framework terminology on disaster risk reduction. https://www.undrr.org/drr-glossary/terminology

U.S. Army Corps of Engineers. (2024). HEC-RAS 2D user's manual (Versión 6.6). Hydrologic Engineering Center. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_2D_Users_Manual_v6.6.pdf

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, 30(1), 79–82. https://doi.org/10.3354/cr030079

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Klein Tank, A., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. WIREs Climate Change, 2(6), 851–870. https://doi.org/10.1002/wcc.147